

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Primož TOMEČ

**OPTIMALNO KOMBINIRANJE KONDENZACIJSKEGA IN
KONVEKCIJSKEGA SUŠILNEGA POSTOPKA**

DIPLOMSKI PROJEKT
Univerzitetni študij – 1. stopnja

**OPTIMAL COMBINATION OF KILN AND DEHUMIDIFICATION
DRYING PROCEDURE**

B. Sc. THESIS
Academic Study Programmes

Ljubljana, 2010

Diplomski projekt je zaključek Univerzitetnega študija prve stopnje 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. Jožeta Kropivška.

Mentor: prof. dr. Željko Gorišek

Recenzent: doc. dr. Jože Kropivšek

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik: prof. dr. Miha HUMAR, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

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

Član: doc. dr. Jože KROPIVŠEK, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

Datum zagovora: 12. 10. 2010

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Primož Tomec

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD Du 1
DK UDK 630*847.2
KG les/sušenje/tehnično sušenje/kondenzacijsko sušenje/stroški
AV TOMEČ, Primož
SA GORIŠEK, Željko (mentor)/KROPIVŠEK, Jože (recenzent)
KZ SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
ZA Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI 2010
IN OPTIMALNO KOMBINIRANJE KONDENZACIJSKEGA
IN KONVEKCIJSKEGA SUŠILNEGA POSTOPKA
TD Diplomsko delo (Univerzitetni študij – 1. stopnja)
OP IX, 48 str., 14 pregl., 24 sl., 20 vir.
IJ sl
JI sl/en
AI Primerjali smo stroške konvencionalnega in kondenzacijskega sušenja lesa. Stroške konvencionalnega sušenja smo izračunali s CAE računalniškim modelom, stroške kondenzacijskega sušenja pa smo ocenili z analizo konkretno izvedenega postopka. Izračun smo naredili na primeru sušenja bukovega lesa (*Fagus Sylvatica* L.), debeline 50 mm. Z oceno in primerjavo stroškov smo predvideli lesno vlažnost, pri kateri je prehod med obema postopkoma sušenja optimalen. Ugotovili smo prednosti začetnega sušenja svežega lesa po kondenzacijskem načinu in nato dosušitev do končne vlažnosti po konvencionalnem postopku. Optimalni prehod med obema načinoma sušenja smo dosegli pri lesni vlažnosti 35,1 %. Večjih prihrankov s kombiniranjem sušenja nismo potrdili, vzrok pa je velika razlika med cenama električne in toplotne energije.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Du 1
DC UDC 630*847.2
CX wood/drying/kiln/dehumidification/costs
AU TOMEČ, Primož
AA GORIŠEK, Željko (supervisor)/KROPIVŠEK, Jože (co-supervisor)
PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
PY 2010
TI OPTIMAL COMBINATION OF KILN AND DEHUMIDIFICATION DRYING PROCEDURE
DT B. Sc. Thesis (Academic Study Programmes)
NO IX, 48 p., 14 tab., 24 fig., 20 ref.
LA sl
AL sl/en
AB The costs of kiln and dehumidification drying of wood were compared. The kiln drying costs were calculated by the CAE computer model, while the dehumidification drying costs assessed by an analysis of the procedure made. Our calculation was done on the basis of the 50 mm thick beech wood drying (*Fagus Sylvatica* L.). The wood moisture was foreseen by assessing and comparing the costs, according to the optimal drying transfer of both procedures. Advantages of the initial dehumidification drying of fresh wood and then drying to the final moisture with the kiln drying procedure were established. The optimal drying transfer of both procedures was achieved at 35.1 % of wood moisture. We were not able to confirm larger savings by drying combinations because of the huge difference in prices between the electrical and thermal energy.

KAZALO VSEBINE

str.

Ključna dokumentacijska informacija (KDI)	III
Key Words Documentation (KWD)	IV
Kazalo vsebine	V
Kazalo preglednic.....	VII
Kazalo slik.....	VIII

1	UVOD	1
1.1	HIPOTEZE	1
1.2	CILJI NALOGE	1
2	SPLOŠNI DEL	2
2.1	KONVEKCIJSKO SUŠENJE	2
2.1.1	Ohišje konvekcijskih sušilnic	4
2.1.2	Naprave za gretje	5
2.1.3	Naprave za prisilno kroženje zraka	5
2.1.4	Naprave za uravnavanje relativne zračne vlažnosti v komori	6
2.2	KONDENZACIJSKO SUŠENJE	7
2.2.1	Kondenzacijski agregat	7
2.2.2	Hladilna sredstva	8
2.2.3	Komore za kondenzacijsko sušenje lesa	9
2.2.4	Uporabnost kondenzacijskega sušenja	9
2.3	EKONOMIKA SUŠENJA	10
3	MATERIAL IN METODE	13
3.1	MATERIALI	13
3.1.1	Les	13
3.1.2	Zložaji žaganega lesa	13
3.1.3	Simulirano konvekcijsko, komorsko sušenje	13
3.1.4	Izbira kondenzacijske sušilne komore	14
3.2	METODE	15
3.2.1	Model optimizacije sušenja	15
3.2.2	Režimi sušenja lesa	17
3.2.2.1	Režim sušenja lesa v komori za konvekcijsko sušenje lesa	17
3.2.2.2	Režim sušenja lesa v komori za kondenzacijsko sušenje lesa	18
3.2.3	Izračuni stroškov sušenja	18
3.2.3.1	Stroški infrastrukture	18
3.2.3.2	Stroški priprave lesa	22
3.2.3.3	Stroški energije	23
3.2.3.4	Izračun skupnih stroškov sušenja	24
3.2.3.5	Izračun stroškov sušenja v odvisnosti od padca lesne vlažnosti	24
4	REZULTATI	25
4.1	KAPACITETE SUŠENJA IN POTREBNE VELIKOSTI KOMOR	25
4.2	KINETIKA SUŠENJA	25

4.2.1	Konvencionalno sušenje	25
4.2.2	Kondenzacijsko sušenje	27
4.3	PORABA ENERGIJE	28
4.4	STROŠKI SUŠENJA	29
4.4.1	Konvekcijsko sušenje	29
4.4.2	Kondenzacijsko sušenje	31
4.5	ODVISNOST STROŠKOV SUŠENJA OD LESNE VLAŽNOSTI	32
4.5.1	Konvekcijsko sušenje	32
4.5.2	Kondenzacijsko sušenje	34
4.6	OPTIMIZACIJA	36
5	RAZPRAVA	40
6	SKLEPI	45
7	POVZETEK.....	46
8	VIRI.....	47
	ZAHVALA	

KAZALO PREGLEDNIC

	str.
Preglednica 1	Struktura stroškov sušenja pri konvencionalnem sušenja 10
Preglednica 2	Specifična poraba energije v procesu sušenja pri konvencionalnem in kondenzacijskem postopku 12
Preglednica 3	Tehnične karakteristike konvencionalne sušilnice (Incoplan, 2010) 14
Preglednica 4	Tehnične karakteristike sušilnice za kondenzacijsko sušenje (Incoplan, 2010) 14
Preglednica 5	Model za izračun stroškov sušenja v štirih korakih 16
Preglednica 6	Ameriški režim sušenja za konvekcijsko sušenje 17
Preglednica 7	Režim za kondenzacijsko sušenje 18
Preglednica 8	Glavne karakteristike sušilnega postroja..... 25
Preglednica 9	Poraba energije pri konvekcijskem in kondenzacijskem sušenju 28
Preglednica 10	Struktura stroškov konvekcijskega sušenja..... 29
Preglednica 11	Struktura stroškov kondenzacijskega sušenja 31
Preglednica 12	Glavne karakteristike sušilnega postroja pri kombiniranem sušenju 37
Preglednica 13	Struktura stroškov pri kombiniranem sušenju..... 38
Preglednica 14	Poraba energije v območju lesne vlažnosti med 60 % in 35 % (nad TNCS)..... 40

KAZALO SLIK

	str.
Slika 1 Shema komore za konvekcijsko sušenje.....	3
Slika 2 Skica komore za konvekcijsko sušenje (Incoplan, 2010)	4
Slika 3 Shema komore za kondenzacijsko sušenje	7
Slika 4 Shema delovanja kondenzacijskega agregata	8
Slika 5 Skica komore za kondenzacijsko sušenje (Incoplan, 2010).....	9
Slika 6 Deleži porabe toplotne energije pri konvekcijskem sušenju (Straže, 2005).....	11
Slika 7 Prikaz sistema povezanih sušilnic (Hildebrand, 2010).....	11
Slika 8 Sušilni diagram (temperatura T , relativna zračna vlažnost φ , ravnovesna vlažnost u_r) in sušilna krivulja za 50 mm debel žagan les bukovine.....	26
Slika 9 Odvisnost sušilne hitrosti od lesne vlažnosti za 50 mm debelo bukovino.....	26
Slika 10 Sušilni diagram (temperatura T , relativna zračna vlažnost φ , ravnovesna vlažnost u_r) in sušilna krivulja za 50 mm debel žagan les bukovine.....	27
Slika 11 Odvisnost sušilne hitrosti od lesne vlažnosti za 50 mm debelo bukovino.....	28
Slika 12 Prikaz deleža različnih stroškov pri konvencionalnem postopku	30
Slika 13 Prikaz deleža različnih stroškov pri kondenzacijskem postopku.....	32
Slika 14 Stroški sušenja m^3 lesa na uro v odvisnosti od lesne vlažnosti pri konvekcijskem sušenju	33
Slika 15 Rast skupnih stroškov pri konvencionalnem sušenju v odvisnosti od vlage	33
Slika 16 Strošek sušenja m^3 lesa na uro v odvisnosti od lesne vlažnosti pri kondenzacijskem sušenju	34
Slika 17 Rast stroškov kondenzacijskega sušenja v odvisnosti od vlage.....	35
Slika 18 Metoda določitve točke optimalnega prehoda iz kondenzacijskega v konvekcijsko sušenje.	36
Slika 19 Prikaz strukture stroškov kombiniranega sušenja.....	39
Slika 20 Obseg stroškov energije pri kombiniranem sušenju	39
Slika 21 Specifični strošek na % lesne vlažnosti v odvisnosti od vlage	41
Slika 22 Prikaz rasti stroškov kondenzacijskega in konvekcijskega sušenja v odvisnosti od lesne vlažnosti	42

Slika 23	Shema strukture stroškov pri konvencionalnem in kondenzacijskem sušenju	43
Slika 24	Shema strukture stroškov pri konvencionalnem, kondenzacijskem in kombiniranem sušenju	44

1 UVOD

Les po poseku vsebuje velike količine vode. Sušenje je zato nujna tehnološka operacija v proizvodnji izdelkov iz lesa. Vsaka delavna operacija v proizvodnji izdelkov iz lesa je povezana s stroški, tudi sušenje lesa. Stroški sušenja sestavljajo velik delež v lastni ceni izdelka.

V strukturi stroškov ima pomembno vlogo energija. Zato je potreben izbor takšne tehnologije, ki optimalno izkorišča energetske vire in omogoča hitro in kakovostno osušitev lesne surovine.

1.1 HIPOTEZE

Kondenzacijsko sušenje, ki ga uvrščamo med nizko temperaturne postopke naj bi bilo učinkovito pri sušenju svežega lesa, bistveno pa naj bi se časi sušenja podaljševali pri sušenju na nizke končne vlažnosti. Za kondenzacijski postopek je značilna velika poraba električne energije, ki jo v lesnopredelovalni industriji vrednotimo mnogo višje kot toplotno pridobljeno iz lesnih ostankov.

Normalno temperaturno konvencionalno sušenje je najbolj razširjen postopek sušenja lesa. Konvencionalno sušenje je v primerjavi z kondenzacijskim postopkom učinkovitejše pri nizkih lesnih vlažnostih. Večino uporabljene energije pri konvencionalnem sušenju sestavlja toplotna energija.

Predvidevamo, da bi kombinacija sušenja svežega lesa v kondenzacijskih sušilnih komorah z dosuševanjem v normalno temperaturnem komorskem postopku z delno izmenjavo zraka privedla do najnižjih stroškov sušenja žaganega lesa.

1.2 CILJI NALOGE

Na primeru fiktivnega podjetja, z letnimi sušilnimi kapacitetami 20 000 m³ svežega žaganega lesa bukovine debeline 50 mm, želimo z natančno analizo kinetike sušenja, porabe energije, kakovosti osušenega lesa in stroškov sušenja ugotoviti optimalno izvajanje sušilnega procesa z uspešnim kombiniranjem kondenzacijskega in konvencionalnega postopka.

Določiti želimo lesno vlažnost, pri kateri prehod iz kondenzacijskega postopka sušenja lesa v konvencionalni način omogoča največje prihranke energije in s tem najnižje stroške sušenja lesa.

2 SPLOŠNI DEL

Sušenje lesa je izredno pomembna in zahtevna tehnološka faza predelave lesa, ki močno vpliva na kvaliteto in lastno ceno končnega izdelka. Časovno in energetsko je sušenje lesa najpotratnejši predelovalni postopek, saj od celotne porabljene energije v lesnopredelovalni industriji odpade 60% le te na sušenje. Naloga sušenja je osušiti les do vlažnosti, ki je primerna za nadaljnjo obdelavo oz. uporabo. Kvaliteta lesa se med postopkom sušenja ne sme zmanjšati, celoten postopek pa mora biti izveden s čim manjšimi stroški. Ekonomičnost sušenja določajo predvsem variabilni stroški, ki jih povzročajo kvaliteta osušenega lesa, čas sušenja, pomembno mesto pa ima tudi porabljena energija. Naraščajoča energetska problematika ta delež v skupnih stroških še povečuje. Zato je pomemben izbor takšne tehnologije, pri kateri bodo energetski viri optimalno izkoriščeni. Pri tem je potrebno upoštevati stopnjo predelave lesa pred sušenjem in mejno področje vlažnosti lesa, pri katerem preidemo iz sušenja lesa na prostem na dosuševanje v tehnični napravi oziroma iz enega tehnološkega postopka na drugega, da se dosežejo minimalni skupni stroški. Poznamo več različnih tehnoloških postopkov med katere spadajo: Normalno temperaturno komorsko sušenje z delno izmenjavo zraka (Konvekcijsko sušenje), Kondenzacijsko sušenje, Vakuumsko sušenje, Visokofrekvenčno sušenje... V nadaljevanju sta opisana le Konvencionalni in Kondenzacijski način sušenja, katera sta tudi uporabljena v analizi sušenja te naloge.

2.1 KONVEKCIJSKO SUŠENJE

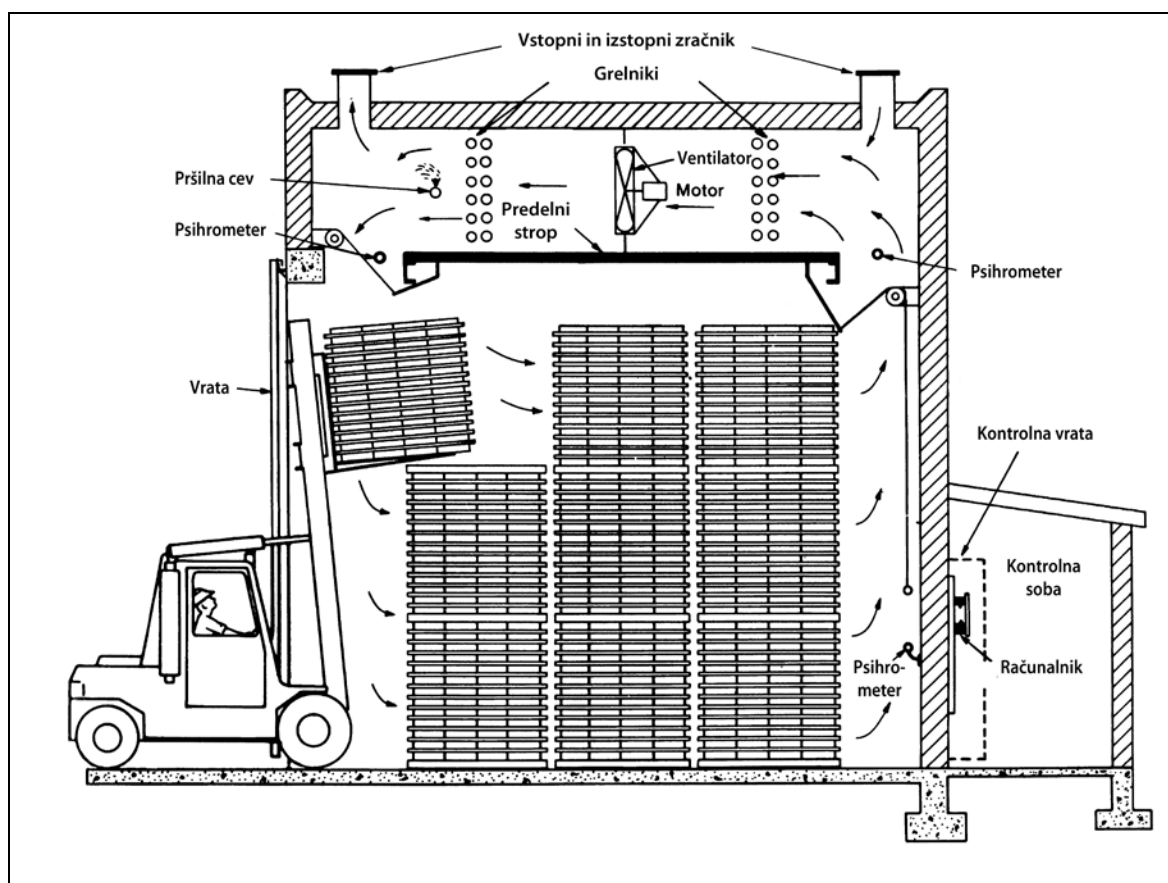
Normalno temperaturno konvekcijsko komorsko sušenje z delno izmenjavo zraka je postopek, po katerem se danes suši in se tudi najverjetneje v prihodnosti bo sušilo največ lesa. Prevlada tega načina sušenja temelji na prednostih, ki jih ima v veliki izbiri velikosti in izvedbi naprav. Komore omogočajo poljubno in vselej najugodnejšo nastavitev in vzdrževanje razmer sušenja glede na vrsto lesa, njegovo debelino ter začetno ali končno vlažnost. Izkoriščanje poceni energije iz lesnih ostankov in najrazličnejše možnosti priključka toplotnih medijev prevesijo odločitve o vlaganjih v nove sušilne naprave v korist konvencionalnim sušilnicam.

Tudi struktura novih zmogljivosti v zadnjih letih pri nas in v Evropi kaže na še vedno največje zanimanje za konvencionalno sušenje, saj se tako suši približno 90 odstotkov vsega žaganega lesa (Gorišek, 2002). V zadnjem času se nekoliko povečuje delež osušenega lesa v kondenzacijskih komorah, medtem ko je delež sušenja v vakuumskih zelo spremenljiv. Kaže omeniti še visokotemperaturno sušenje v državah severne Evrope, medtem ko so vsi drugi postopki specialni in večinoma povezani s postopki krivljenja, dimenzijske stabilizacije ali zaščite.

Komorska sušilnica se v splošnem uporablja in je primerna za vse vrste lesa. Les v komori miruje, spreminja se klima, ki jo prilagajamo vlažnosti lesa glede na vrsto in debelino. Les sušimo pri najvišji možni temperaturi in ob hitrem gibanju zraka, tako da se čim prej posuši. Da bi zagotovili kontinuirano proizvodnjo in visoko kakovost, les po sušenju še »temperiramo« in »umirimo« v prostoru z nadzorovano klimo.

Temperature v konvencionalnih sušilnicah so glede na sušečo se lesno vrsto, debelino in vlažnost od 40 do 100 °Celzija, relativna zračna vlažnost je med 20- in 100-odstotna, hitrost zraka pa navadno od 1,5 do 4 m/s. Izraz konvekcijski se nanaša na značilen prenos toplote in snovi (vode) z zrakom. Ta se v posebnem prostoru (agregatu) kondicionira (segreje, navlaži ali z delno izmenjavo tudi razvlaži) in v sušilnem prostoru segreje les, od njega pa sprejme oddano vodo.

Komorske sušilnice se razlikujejo po velikosti, izvedbi (zidane, kovinske), dimenzijah zložajev lesa ali sortimentov, načinu polnjenja in praznjenja, vrsti grelnega medija oziroma grelnih naprav, po napravah za kroženje zraka ter po vrsti merilnih in regulacijskih naprav. Neto zmogljivosti konvencionalnih sušilnih komor je od nekaj do več sto kubičnih metrov, kar omogoča primerno izbiro tako za manjšo obrtniško proizvodnjo kot tudi za visoko produktivne industrijske obrate (Gorišek, 2004).



Slika 1 Shema komore za konvekcijsko sušenje (Simpson, 1991)

2.1.1 Ohišje konvekcijskih sušilnic

Po konstrukcijski izvedbi so komore zidane ali montažne izvedbe. Zidane so toplotno stabilnejše in korozivno odpornejše, medtem ko je gradnja montažnih hitrejša, lažje jih nadgradimo (modularna gradnja) in tudi segrevanje je hitrejše. Ne glede na izvedbo morajo sušilne komore zadostiti strogim zahtevam:

- toplotne izoliranosti,
- tesnosti oziroma nepropustnosti za paro in kondenzirajočo vodo
- korozijske odpornosti,
- nosilnosti.

Dobra toplotna izoliranost ni pomembna zgolj zaradi zmanjševanja transmisijских toplotnih izgub, kar nam narekujejo visoki stroški porabljene energije, temveč tudi zaradi preprečevanja kondenzacije vodne pare ter drugih hlapljivih in agresivnih organskih komponent (ocetna in mravljična kislina, tanini ...) na hladnih površinah. Kondenzat negativno vpliva na toplotne lastnosti celotne zgradbe, agresivno deluje na vgrajene materiale in zmanjšuje njihovo trajnost ali pa z obarvanjem lesa zmanjša kakovost osušenega materiala. Nevarnostim negativnega vpliva kondenzata se izognemo z:

- odstranitvijo toplotnih mostov (zračniki, vrata, dovodi grelnega medija in vode za navlaževanje, nosilni konstrukcijski elementi, spojni elementi ...),
- drenažnimi jaški zunaj sušilne komore, s preprečevanjem poškodb na konstrukciji,
- učinkovitimi premazi.

Dobro izolirane sušilne komore povečajo tudi energijsko učinkovitost sistema in zmanjšujejo emisije. Koeficient toplotne prehodnosti naj ne bi presegel vrednosti $0,8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, boljši proizvajalci pa že zagotavljajo konstrukcijo s toplotno prehodnostjo pod $0,4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.



Slika 2 Skica komore za konvekcijsko sušenje (Incoplan, 2010)

V ogrodje sušilnice so vgrajena vrata, ki morajo ustrezati transportu lesa in lokaciji. Vrata naj bi imela čim manjšo površino, vendar morajo biti enako toplotno izolirana kot stene sušilnice. Sistemi zapiranja morajo zagotavljati hitro, varno in tesno zapiranje. Tesnilo vrat mora biti odporno proti visoki temperaturi in kondenzatu; poškodovano je treba zamenjati. V okolici vrat najpogosteje pride do kondenzacije, zato je potrebna dobra zaščita vseh delov vrat pred korozijo (Gorišek, 2004).

2.1.2 Naprave za gretje

Sušenje lesa uvrščamo med termodifuzijske postopke, zato je za učinkovito sušenje potrebno les in naprave v komori segreti oziroma pregreti na temperaturo sušenja ter jo med postopkom vzdrževati na optimalni ravni. Največ toplote se porabi na začetku pri segrevanju in v zimskih mesecih.

Najpomembnejši del naprav za ogrevanje so grelniki, ki delujejo kot toplotni izmenjevalci in so nameščeni tako, da zagotavljajo enakomerno segrevanje celotne komore. Prenos toplote z grelnih medijev je učinkovitejši od segrevanja zraka v komori, zato toplotni tok povečamo z večjo površino (šopi rebrastih cevi, pločevinasta jeklena ali bimetalna navitja ...).

Instalirana moč grelnih naprav je odvisna od velikosti sušilne komore, želene temperature in hitrosti sušenja, to pa predvsem od lesne vrste, vlažnosti lesa in kakovosti sušenja.

2.1.3 Naprave za prisilno kroženje zraka

Še pomembnejše kot grelne naprave so v konvekcijskih komorah naprave za prisilno kroženje zraka.

Najpogosteje uporabljamo ventilatorje, ki morajo zagotoviti:

- prenos toplote z grelnikov na površino lesa,
- odstranjevanje uparjene vode s površine lesa,
- mešanje zračnih tokov pri izmenjavi zraka.

V trenutni ponudbi lahko najpogosteje izbiramo med tremi sistemi prepihanja. Najpogostejši so »stropni« osni (aksialni) ventilatorji, za njimi bočno postavljeni ventilatorji, ki so prav tako osni, vendar praviloma večjih premerov, vse manj pogosta pa je uporaba radialnih ventilatorjev (Gorišek, 2004).

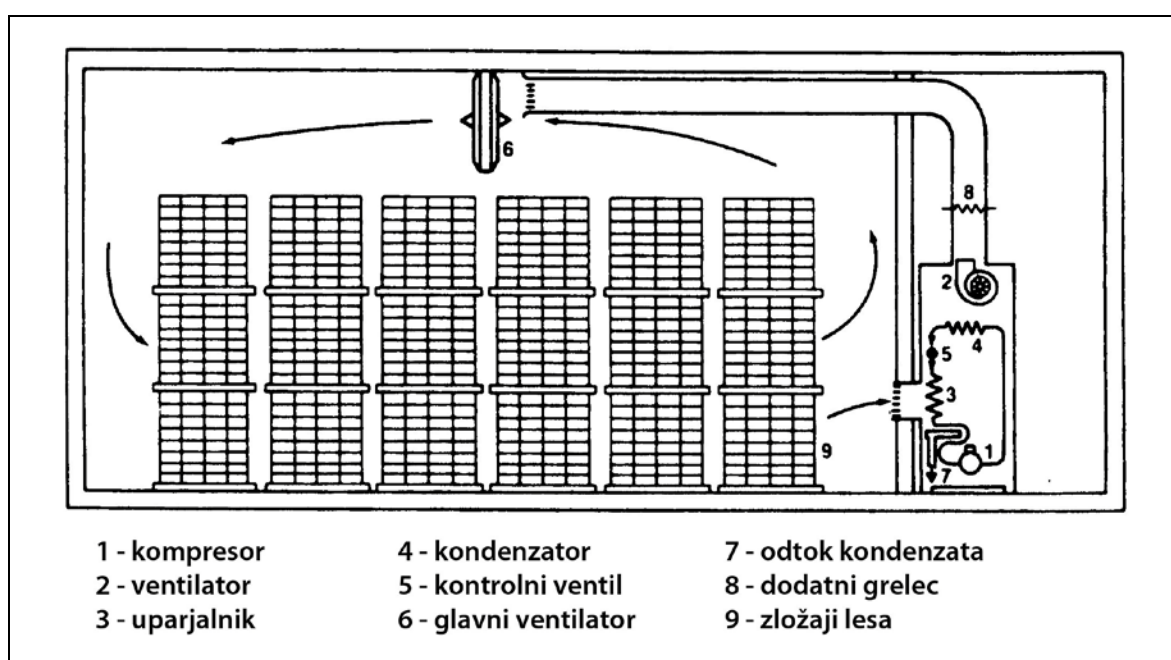
Najmanjša, še sprejemljiva hitrost zraka, ki še zagotavlja izenačene razmere sušenja pri zelo počasi sušečih se lesovih, je 1,3 metra na sekundo, za sušenje gostejših listavcev pa se priporočajo hitrosti od 1,5 do 2,5 metra na sekundo (kar pomeni od 0,15 do 0,3 kW instalirane moči na kubični meter) in za iglavce od 3 do 4 metre na sekundo (od 0,25 do 0,4 kW instalirane moči na kubični meter). V komorah z vzdolžnim prepihanjem morajo biti hitrosti od 4 do 8 metrov na sekundo. Novejše komore imajo tudi možnost regulacije hitrosti kroženja zraka, ki mora biti pri sušenju svežega lesa največja in se zmanjšuje pri sušenju lesa pod točko nasičenja celičnih sten. Treba je poudariti tudi zahtevo po večjih hitrostih zraka pri sušenju svetlih lesov, ki jim želimo ohraniti barvo.

2.1.4 Naprave za uravnavanje relativne zračne vlažnosti v komori

Poleg uravnavanja ustrezne temperature je v sušilnem postopku še pomembnejše zagotavljanje predpisane relativne zračne vlažnosti, ki neposredno določa tudi ostrino sušenja. Zaradi izločanja velikih količin vode se ostrina nenehno zmanjšuje, zato je zrak med procesom sušenja treba razvlaževati oziroma sušiti. Zrak lahko osušimo s segrevanjem, kondenzacijo in delno izmenjavo. Zadnje je pri normalno temperaturnem komorskem konvekcijskem sušenju najobičajnejše. Za izmenjavo se uporabljajo odprtine z zračniki in loputami za uravnavanje količine vstopnega in izstopnega zraka. Število in dimenzije zračnikov priredimo enakomerni izmenjavi zraka v komori. Pri milejših režimih je treba zagotoviti dobro tesnjenje, pri sušenju svežega lesa pa zadostno količino izmenjavajočega se zraka (Gorišek, 2004).

2.2 KONDENZACIJSKO SUŠENJE

V nizkotemperaturni kondenzacijski sušilnici se vzdržuje temperatura med 20 °C in 45 °C. Relativna zračna vlažnost se giblje med 20 in 70 %. Hitrost zraka je običajno enaka kot pri normalnotemperaturnem komorskem sušenju in se giblje med 1,3 in 3,5 m/s. Zrak vlago oddaja s kondenzacijo. Glavne prednosti kondenzacijskega sušenja so boljša energijska učinkovitost, zadovoljiva kontrola pogojev sušenja, širok razpon sušilnih pogojev, blažji režimi (boljša kakovost osušenih izdelkov) in zmanjševanje stroškov sušenja. Glavne hibe tega načina sušenja pa so dolgotrajno sušenje pri doseganju nizkih končnih vlažnosti, poraba električne energije, nevarnost zaledenitve uparjalnika pri nizkih temperaturah in težavno izenačevanje in kondicioniranje.



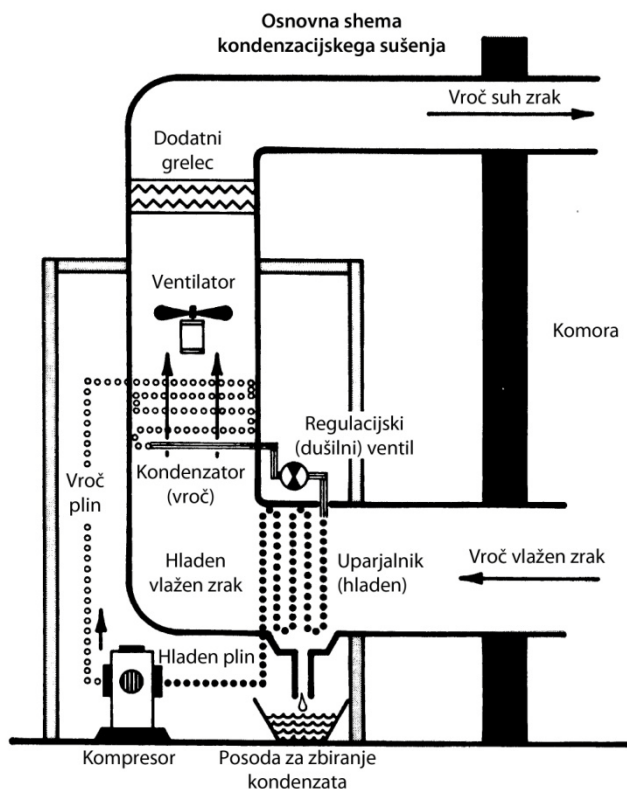
Slika 3 Shema komore za kondenzacijsko sušenje (Simpson, 1991)

2.2.1 Kondenzacijski agregat

Pri napravah za kondenzacijsko sušenje govorimo o zaprtem ventilacijskem sistemu, brez povezave z zrakom iz okolja.

Glavni sestavni del Kondenzacijske sušilnice je toplotna črpalka, ki je sestavljena iz kompresorja, uparjalnika in kondenzatorja. Skozi ta sistem kroži hladilno sredstvo. Zrak iz sušilne komore, ki se pri prehodu skozi zložaje lesa navlaži in nekoliko ohladi, najprej prehaja skozi uparjalnik. Uparjalnik deluje kot toplotni izmenjevalec. Hladilno sredstvo se zaradi toplote zraka upari, sam zrak pa se ohladi. Zaradi podhladitve mu absolutna zračna vlažnost naraste preko točke rosišča, tako se pri tem izloči voda v obliki kondenzata, ki po posebni cevi steče iz agregata. Hladilno sredstvo, ki je prevzelo toploto zraka, prehaja v kompresor, kjer se komprimira (poveča se energija hladilnega sredstva) in nato steče v kondenzator, ki prav tako deluje kot izmenjevalec toplote. V kondenzatorju se ohlajeni in razvlaženi zrak ponovno segreje na sušilno temperaturo (toploto prejme od hladilnega

sredstva, ki se ohladi), ki jo zahteva sušilni režim. Torej več kondenzata se izloči na uparjalniku, tem več toplote se tudi sprosti na kondenzatorju.



Slika 4 Shema delovanja kondenzacijskega agregata (Simpson, 1991)

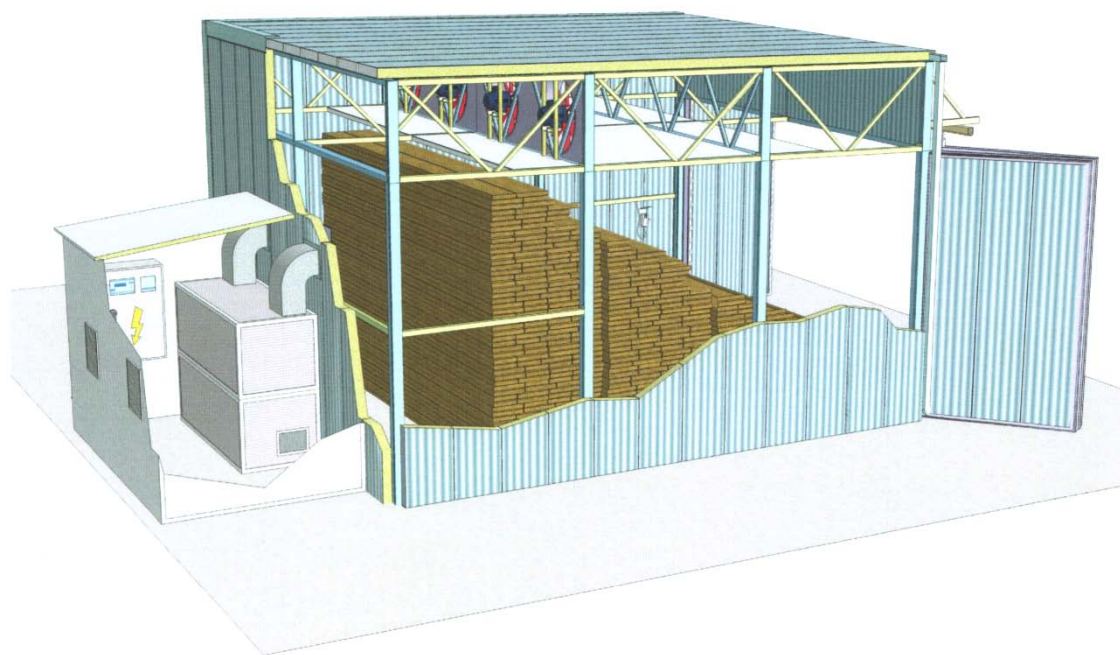
Z uporabo toplotne črpalke lahko začnemo šele pri temperaturi zraka nad 15 °C. Pri nižjih temperaturah obstaja velika nevarnost, da uparjalnik zaledeni. V presledkih med lamelami se nabere led, kar onemogoči kroženje zraka. Pri nižjih temperaturah se zato zrak predhodno segreje z dodatnimi grelniki, najpogosteje električnimi.

2.2.2 Hladilna sredstva

Kapaciteta toplotne črpalke je odvisna od hladilnega sredstva. Hladilna sredstva so snovi, ki imajo pri atmosferskem tlaku nizka vrelišča in pri izparevanju vežejo veliko toplote. Glavne zahteve hladilnih sredstev so velika specifična in izparilna toplota, nevnetljivost, netoksičnost in nekorozivnost, termična in kemična stabilnost, in ekološka sprejemljivost. V preteklosti se je najpogosteje uporabljalo hladilno sredstvo R 12 (CHCl_2F_2). Zaradi svoje škodljivosti do ozonske plasti, v novejših napravah ni več dovoljen. Zraven svoje škodljivosti, je njegova uporabnost bila omejena z temperaturo 45 °C. Za nizkotemperaturno kondenzacijsko sušenje (do 50 °C) se v danes najpogosteje uporabljajo halogenizirani ogljikovodiki – CFC, amonijak in ogljikov dioksid. Novejša hladilna sredstva, kot sta Propan in Butan, so prijaznejša do okolja in dovoljujejo uporabo pri temperaturah do 60 °C.

2.2.3 Komore za kondenzacijsko sušenje lesa

Komore za kondenzacijsko sušenje so skupaj z sistemom za prisilno kroženje zraka, skoraj identične komoram za konvencionalno sušenje. Glavni kriterij pri načrtovanju sušilnih komor za kondenzacijsko sušenje je dobra toplotna izolacija. S tem znižamo toplotne izgube in maksimiramo prihranek pri rekuperaciji toplotne energije. Komora mora dobro tesniti in biti odporna proti visokim vlažnostim. Prav zaradi nevarnosti korozije, je toplotna črpalka nameščena v posebnem prostoru zraven komore. Uparjalnik in kondenzator toplotne črpalke ter vsi kanali za transport zraka morajo biti izdelani iz aluminija ali nerjavečega jekla. V komori za stalen tok zraka skrbijo aksialni ventilatorji (primarni). Potrebna moč primarnih ventilatorjev se določa na enak način kot pri normalno temperaturnem komorskem sušenju z delno izmenjavo zraka. Za pretok zraka skozi toplotno črpalko skrbi dodatni ventilator (sekundaren), ki je najpogosteje nameščen v samem kanalu za transport zraka iz komore do toplotne črpalke in nazaj. Potrebna moč sekundarnih ventilatorjev se giblje med 0,4 – 3,0 kW. Potrebna moč sekundarnega ventilatorja se računa iz predpostavke, da je za uspešno kondenzacijsko sušenje v eni uri potrebno 15 krat zamenjati zrak v komori. Odvajanje kondenzata iz toplotne črpalke je nadzorovano. Količino kondenzata lahko merimo in s tem natančno določimo učinkovitost sušenja.



Slika 5 Skica komore za kondenzacijsko sušenje (Incoplan, 2010)

2.2.4 Uporabnost kondenzacijskega sušenja

Nepravilno delovanje naprave, lahko tako kot pri normalno temperaturnem komorskem sušenju, tudi pri kondenzacijskem vodi do napak lesne surovine. Zato so tudi pri kondenzacijskem sušenju nujno potrebni zanesljivi in natančni režimi, ki jih je potrebno

upoštevati. Uporaba nizkotemperaturnega kondenzacijskega sušenja je gospodarna pri sušenju lesa do minimalnih vlažnosti okoli 15 %. Iz dosedanjih izkušenj je razvidno, da se ta način lahko uporablja za predsušenje trdih listavcev, kjer naj bi končna vlažnost ne bila manjša od 15 do 20 % (Gorišek, 1994). Sušenje pri nizkih temperaturah omogoča relativno visoko kvaliteto osušene surovine, predvsem les ohranja svojo naravno barvo in se le malo poškoduje. Glavna pomanjkljivost takšnega načina sušenja je v izredno dolgih sušilnih časih, pri sušenju trdih listavcev do nizkih končnih vlažnosti (8-10 %). Poraba energije je pri kondenzacijskem sušenju lahko 2- do 3- krat manjša kot pri komorskem sušenju (Gorišek, 1994). Vendar je zaradi visokih cen električne energije, ki lahko tudi do 2- krat presegajo cene toplotne energije pridobljene iz lesnih ostankov, primerjava možna le v stroškovnih enotah.

2.3 EKONOMIKA SUŠENJA

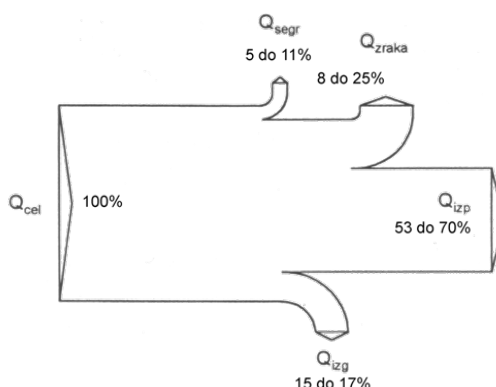
Čas in energija, potrebna za sušenje lesa in s tem povezani stroški so med najvišjimi v proizvodnji lesnih izdelkov. Analiza stroškov sušenja je zelo zapletena, saj je potrebno oceniti stroške investicij, vzdrževanja, dela in energetike. K analizi, pa je potrebno priključiti tudi stroške napak lesa.

Preglednica 1 Struktura stroškov sušenja pri konvencionalnem sušenju (Povzeto po Gorišek, 1994 in Trübswetter, 2006)

Stroški	M. Ilić (1984)	M. Popowitsch, Rosenheim (1965)	Mrak (1984)	Gorišek et al. (1994)	Mühlböck (2004)
toplotne energije	35%	56%	42%	43%	34%
električne energije	14%	7%	19%	14%	8%
investicij	15%	11%	11%	8%	10%
dela	16%	16%	14%	16%	16%
ostalo	20%	10%	14%	19%	32%

* Po podatkih M. Popowitscha, Rosenheim 1985, je v kalkulaciji za toplotno energijo upoštevano kurilno olje.

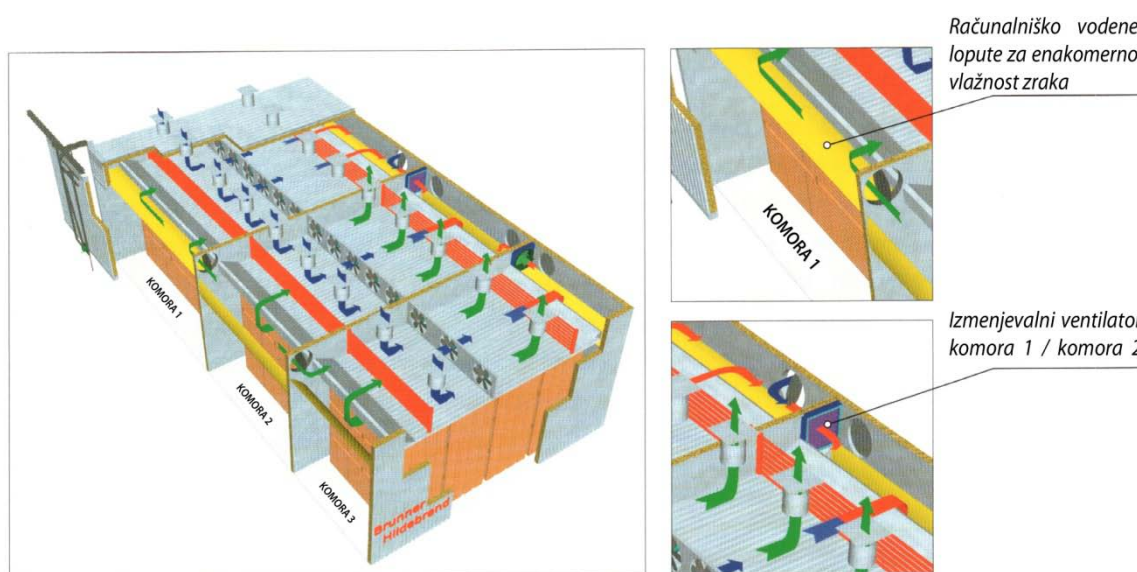
Največji del stroškov pri sušenju lesa v konvencionalnih sušilnicah pripada toplotni energiji (Pregl. 1), vsekakor pa ne smemo zanemariti porabe električne energije. Razmerje med porabo toplotne in električne energije je zelo raznoliko in je odvisno od mnogih dejavnikov (lesna vrsta, debelina sortimenta, začetna in končna lesna vlažnost, vrsta in velikost sušilnih komor, dostopnost energije in njena cena). V predelavi lesa naj bi sušenje predstavljalo kar 80 % vse porabljene toplotne in 15 % vse porabljene električne energije (Gorišek, 1994). Toplotna energija se pri konvencionalnem sušenju v večini porablja za segrevanje komore in naprav v njej, segrevanje vlažnega lesa, segrevanje vstopajočega okoliškega zraka, izparevanje vode in premagovanje sorpcije in nadomeščanje toplotnih izgub. Največ toplote se porabi za izparevanje in premagovanje sorpcije. Ta odstotek nam pove tudi energijsko učinkovitost komore. Višji je odstotek, višja je tudi energijska učinkovitost postopka sušenja lesa.



Slika 6 Deleži porabe toplotne energije pri konvekcijskem sušenju (Straže, 2005)

Električna energija, pa se pri konvekcijskem sušenju lesa v večini porablja za prisilno kroženje zraka v komori in za krmiljenje naprav.

Skupna poraba energije pri konvencionalnem sušenju se zelo razlikuje, glede na Seeger (1989) lahko niha celo med 140 kWh in 1260 kWh na m³ suhega lesa. Za primerjavo energetskih učinkovitosti različnih tehnik sušenja je najprimernejša specifična poraba energije (Pregl. 2). Ta termin označuje porabo energije, ki je potrebna za izločitev 1 kg vode. Nad točko nasičenja celičnih sten (TNCS) specifična poraba energije variira med 3,4 MJ/kg in 6,23 MJ/kg izločene vode. Pod TNCS lahko specifična poraba energije močno naraste, tudi do 10,5 MJ/kg (Villier, 1982; Brunner, 1987; Guzenda in Olek, 2004). Velika poraba energije zahteva tudi upoštevanje splošnih tehnoloških ukrepov, za njeno zmanjšanje. Eden od osnovnih ukrepov je redno vzdrževanje vse opreme. Le redno vzdrževana sušilna oprema omogoča minimalne izgube energije. Učinkovitost sušilnih komor se lahko poveča z zadostno toplotno izolacijo, uporabo sistemov za rekuperacijo toplotne energije in s pomočjo sistemov povezanih sušilnic (Sl. 7).



Slika 7 Prikaz sistema povezanih sušilnic (Hildebrand - Brunner, 2010)

Pri varčevanju z električno energijo je racionalna rešitev uporaba frekvenčnih regulatorjev vrtljajev elektromotorjev za pogon ventilatorjev. Lippold (1987) navaja, da s tem načinom možen 45 % energijski prihranek pri sušenju pod TNCS. Ekonomske učinke varčevanja z električno energijo je mogoče še izboljšati s prilagajanjem tarifnim razredom. Pri zniževanju porabe energije in stroškov so uporabni tudi kombinirani sistemi različnih tehnik sušenja lesa. Gorišek, s sod. (2009) navajajo, da je pri uporabi kombinacije naravnega in konvencionalnega komorskega sušenja, možen 48 – 72 % prihranek energije pri sušenju 38 mm debelih bukovih žaganic. Znižanje stroškov pri takšni kombinaciji sušenja obsega med 8,7 do 33,2 %, odvisno od letnega časa.

Preglednica 2 Specifična poraba energije v procesu sušenja pri konvencionalnem in kondenzacijskem postopku

Tip lesa	Specifična poraba energije MJ/kg	Avtor
<u>Normalno temperaturno komorsko sušenje</u>		
les z nizko gostoto	4,5 - 5,8	Anon (1980)
les z visoko gostoto	5,4 - 6,8	
ne loči	7,5	Bedner (1980)
ne loči	4,7	Egger & Tronstad (1980)
iglavci	3,6 - 7,2	Hess (1980)
listavci	3,6 - 10	
iglavci	3,2 - 5,4	Teiscshinger (1981)
listavci	4,9 - 5,1	
ne loči	3,9 - 4,8	Vanicek (1980)
<u>Kondenzacijsko sušenje</u>		
ne loči	2,5 - 6,4	Arganbright (1979)
ne loči	6,8	Bedner (1980)
ne loči	3,2 - 3,7	Eggen (1980)
iglavci	3,6	Landenberger (1981)
iglavci	2,0 - 2,5	Teiscshinger (1981)
listavci	3,1 - 3,2	
ne loči	2,5 - 6,4	Ullevalseter (1971)

Kljub temu, da je specifična poraba energije pri kondenzacijskem sušenju manjša kot v normalno temperaturnih komorskih sušilnicah, pa se moramo zavedati, da porabljamo električno energijo, ki lahko v nekaterih državah tudi 3 krat presega vrednost toplotne, ki se v večini uporablja pri konvencionalnem postopku sušenja.

3 MATERIAL IN METODE

3.1 MATERIALI

3.1.1 Les

Za analizo kinetike sušenja, porabe energije, kakovosti osušenega lesa in stroškov sušenja smo uporabil les bukve (*Fagus sylvatica* L.). Hipotetično smo predpostavili, da obravnavamo podjetje z letno sušilno kapaciteto 20 000 m³ žaganega lesa bukovine, debeline 50 mm. Les ima ob začetku sušilnega postopka vlažnost 60 %. Ciljna končna vlažnost lesa znaša 8%.

3.1.2 Zložaji žaganega les

Uporabljene nerobljene žaganice bukovine (*Fagus sylvatica* L.) so bile zložene v zložaje standardnih mer 1,2 x 1,2 x 4 m (višina x širina x dolžina). Debelina uporabljenih distančnih letvic je znašala 25 mm.

3.1.3 Simulirano konvekcijsko, komorsko sušenje

Za izhodišče pri določanju porabe energije v postopku komorskega sušenja smo uporabili večjo sušilno komoro uporabnih dimenzij 7,32 x 13,08 x 4 m (globina x dolžina x višina). Izvedba simulirane komore je montažna, z aluminijasto nosilno konstrukcijo. Izolacijo sestavljajo standardni izolativni paneli, debeline 100 mm, s čimer dosegamo pri stenah komore nazivno toplotno prehodnost $k = 0,368 \text{ W/m}^2\text{K}$. Predpostavljena je bila polnitev komore s 36 zložaji lesa, standardnih dimenzij 1,2 x 4,0 x 1,2 m (širina x dolžina x višina). Sušenje 50 mm debele bukovine (*Fagus sylvatica* L.) omogoča 60 % zapolnjenost zložajev, kar pomeni 123,76 m³ neto zapolnitve komore.

Vrednost komore, potrebna pri izračunu stroškov, smo pridobili iz ponudbe Italijanskega proizvajalca sušilnih komor Incoplan (Pregl. 3). Ponudba je obsegala sušilno komoro tipa Classe modular 3000 – 100 z drsnimi vrati. Dimenzije komore so bile enake predpostavljenim v simulaciji sušenja. Izolacija ponujene sušilne komore je bila sestavljena iz panelov širine 600 mm in debeline 116 mm. Zunanjo stran panelov sestavlja legiran aluminij debeline 0,6 mm, notranjost pa je zapolnjena z mineralno volno debeline 100 mm, gostote 30 kg/m³. Komora je opremljena z 10 aksialnimi ventilatorji iz aluminija z premerom lopatic 800 mm in močjo motorja 3 kW. Sistem navlaževanja je izveden s hladno vodo pod pritiskom 3 bar. Predpisana moč peči za takšno komoro znaša 593 kW. Za kontrolo sušenja je v komori nameščenih 8 merilnih mest vlažnosti, 2 merilni mesti za merjenje relativne zračne vlažnosti in dve merilni mesti temperature. Cena takšne sušilne komore znaša 57.505,00 €, k temu je pa je potrebno prišteti še 7.000,00 € za montažo. Torej skupna nabavna vrednost postavitve ene sušilne komore za konvencionalno sušenje z delno izmenjavo zraka znaša 64.505,00 €.

Preglednica 3 Tehnične karakteristike konvencionalne sušilnice (Incoplan, 2010)

SUŠILNA KOMORA ZA KONVENCIONALNO SUŠENJE

Uporabna dolžina x globina x višina	13,08 x 7,32 x 4 m
Kapaciteta komore	125 m ³ , 36 zložajev
COAT paneli z mineralno volno	debeline 116 mm
Koeficient temperaturne prehodnosti	1,4 kJ/m ² h°C
Število ventilatorjev	10 kom. z premerom 800mm
Motorji za pogon ventilatorjev	3 kW, Reverzibilni
Naprave za vlaženje	hladna voda 3 bar
Izmenjevalec toplote	lamelni z močjo 2,1 MJ/h (593 kW)
Cena v ponudbi za komoro	57.505,00 €
Cena montaže	7.000,00 €

3.1.4 Izbira kondenzacijske sušilne komore

Pri določanju vrednosti sušilne komore za kondenzacijsko sušenje lesa, smo se odločili za komoro enakih dimenzij in enakega proizvajalca kot pri konvekcijskem sušenju. Pridobljena ponudba je obsegala sušilnico tipa Classe Modular 3000 – 100 z drsnimi vrati primerno za kondenzacijsko sušenje vseh »trših« lesnih vrst (Pregl. 4). Komoro sestavljajo paneli z mineralno volno debeline 116 mm. Komora je opremljena z osmimi aksialnimi ventilatorji premera lopatic 800 mm in močjo 3 kW. Navlaževanje je izvedeno s sistemom na hladno vodo pod tlakom 3 bar. Komora vsebuje kondenzacijsko napravo ECO 100, z nominalno močjo kompresorja 25 kW, glavnim električnim ventilatorjem 7,5 kW in močjo električnega grelca 27 kW. Kontrola sušenja je izvedena enako kot pri komori za konvencionalno sušenje. Cena ponujene sušilne komore za kondenzacijsko sušenje znaša 92.635,00 €. Vrednost montaže komore, pa znaša 7.800,00 €. Torej skupna vrednost nakupa in postavitve ene sušilne komore za kondenzacijsko sušenje znaša 100.435,00 €.

Preglednica 4 Tehnične karakteristike sušilnice za kondenzacijsko sušenje (Incoplan, 2010)

SUŠILNA KOMORA ZA KONDENZACIJSKO SUŠENJE

Uporabna dolžina x globina x višina	13,08 x 7,32 x 4 m
Kapaciteta komore	125 m ³ , 36 zložajev
COAT paneli z mineralno volno	debeline 116 mm
Koeficient temperaturne prehodnosti	1,4 kJ/m ² h°C
Število ventilatorjev	8 kom. z premerom 800mm
Motorji za pogon ventilatorjev	3 kW, Reverzibilni
Naprave za vlaženje	hladna voda 3 bar
Moč kompresorja toplotne črpalke	25 kW
Ventilator toplotne črpalke	7,5 kW
Moč električnega grelca	27 kW
Cena v ponudbi za komoro	92.635,00 €
Cena montaže	7.800,00 €

3.2 METODE

3.2.1 Model optimizacije sušenja

Model optimizacije sušenja sestavljajo 4 sklopi z pripadajočimi bazami podatkov in / ali izračuni (Pregl. 5).

Osnovne informacije so zbrane v prvem podatkovnem sklopu, ki vsebuje podatke o lesu (vrste lesa, dimenzije, začetna lesna vlažnost, končna lesna vlažnost), zložajih (dimenzije, debelina distančnih letvic, volumen lesa v zložaju) in sušilnih komorah (dimenzije, volumen lesa v komori, konstrukcija, toplotna izolacija, toplotne in električne inštalacije).

Za določitev kinetike sušenja in energijsko porabo za konvekcijsko sušenje smo uporabili računalniško podprt (CAE) model energijske učinkovitosti sušenja žaganega lesa s simulacijo kinetike sušenja in delovanja konvekcijske sušilne komore. (Straže & Gorišek, 2007). Iz CAE modela je mogoče predvideti tipično sušilno krivuljo in sušilni diagram, čas sušenja, specifično porabo na kg izločene vode, porabo na uro sušenja. Pri kondenzacijskem sušenju, pa smo vse podatke (sušilna krivulja, sušilni diagram, čas sušenja, specifična poraba na kg izločene vode, poraba na uro sušenja) pridobili iz izvedenega eksperimentalnega sušenja.

V tretjem podatkovnem sklopu modela so na podlagi parametrov sušenja in stroškov izračunani skupni stroški sušenja za oba načina sušenja lesa (konvekcijsko in kondenzacijsko). To omogoča ocenjevanje vpliva različnih faktorjev, ki vplivajo na stroške sušenja: stroški amortizacije infrastrukture, stroški amortizacije priprave zemljišč, stroški vzdrževanja in zavarovanja, stroški priprave in transporta lesa, poraba toplotne in električne energije, energijska učinkovitost komore.

Glede na kinetiko sušenja in končne stroške sušenja, izračunane v drugem in tretjem koraku, lahko v nadaljnjih izračunih analiziramo in predvidimo vpliv trajanja sušenja in vlažnosti lesa na stroške sušenja, tako za konvencionalno kot kondenzacijsko sušenje. Sušenje lesa do nizkih končnih vlažnosti vodi v izrazito podaljšanje časov sušenja in povišanje stroškov sušenja. Definirali smo optimalno točko lesne vlažnosti pri kateri bi zaključili z kondenzacijskim sušenjem in les do končne vlažnosti dosušili po konvencionalnem postopku. Ta vlažnost ustreza točki, kjer je rast stroškov enaka za oba postopka sušenja. Matematično točko vlažnosti premika iz kondenzacijskega postopka v konvencionalni postopek določimo z enačenjem izpeljav stroškovnih krivulj za konvencionalni in kondenzacijski postopek (Enač. 1).

Preglednica 5 Model za izračun stroškov sušenja v štirih korakih



$$\frac{dS_{konv}}{du} = \frac{dS_{kond}}{du} \quad \dots(1)$$

kjer je:

dS.....odvod stroškov po času

du.....odvod lesne vlažnosti po času

Glede na izračunano točko vlažnosti, pri kateri je smotrno zamenjati postopek sušenja, lahko predvidimo zmanjšanje porabe energije, povečanje sušilnih kapacitet in konec koncev tudi prihranek pri skupnih stroških sušenja.

3.2.2 Režimi sušenja lesa

3.2.2.1 Režim sušenja lesa v komori za konvekcijsko sušenje lesa

V tej nalogi je bil uporabljen pristen Ameriški režim za sušenje bukovine debeline 50 mm, povzet po Simpsonu (1991)(Pregl. 6). Sam režim je izredno oster. Časi sušenja po takšnih režimih so izredno kratki in s tem posledično so tudi sami stroški takšnega sušenja nizki. Sama kvaliteta osušenega lesa, pa je pri takšnem sušenju vprašljiva.

Preglednica 6 Ameriški režim sušenja za konvekcijsko sušenje

Faza	vlažnost			temperatura			RZV	ostrina	čas	
	u _z [%]	u _k [%]	u _r [%]	T _s [°C]	T _m [°C]	ΔT [°C]	φ [%]	/	t [h]	Σt [h]
Segrevanje	60	60	/	7 °C/h	/	/	90-95	/	12,5	12,5
Sušenje	60	50	22,5	49	48	1	94	2,67	37,4	49,9
	50	40	22,5	49	48	1	94	2,22	45,8	95,7
	40	35	18,1	49	47	2	89	2,21	27,4	123,1
	35	30	15,8	49	46	3	83,6	2,22	28,7	151,8
	30	25	12,4	54	49	5	74,6	2,42	30,6	182,4
	25	20	6,6	60	46	14	46	3,79	34,0	216,4
	20	15	2,8	66	38	28	17	7,14	40,7	257,1
	15	8	3,1	71	43	28	20	4,84	89,0	346,2
Izenačevanje	8	8	6	71	/	/	/	1,33	16,7	362,9
Kondicioniranje	8	8	11	71	/	/	/	0,73	33,4	396,2
Ohlajanje	8	8	8	7 °C/h	/	/	/	1,00	12,5	408,7

3.2.2.2 Režim sušenja lesa v komori za kondenzacijsko sušenje lesa

Režim, uporabljen pri eksperimentalnem kondenzacijskem sušenju (Pregl. 7) je bil povzet po proizvajalcu komore. Sam režim je v primerjavi z uporabljenim režimom za konvekcijsko sušenje nekoliko manj oster. Kljub temu, da se povprečna ostrina giblje med 3 in 4, se sušenje odvija pri nizkih temperaturah, kar je dosti bolj prijazno do lesne surovine in omogoča sušenje z dosti manj napakami in obarvanji lesa.

Preglednica 7 Režim za kondenzacijsko sušenje

Korak	vlažnost			temperatura			RZV	ostrina	čas	
	u_z [%]	u_k [%]	u_r [%]	T_s [°C]	T_m [°C]	ΔT [°C]	φ [%]		t [h]	Σt [h]
1	60	60	13,7	28	24	4	70	4,38	0,0	0,0
2	60	60	11,9	29	24	5	65	5,04	3,5	3,5
3	60	40	10,8	31	25	6	60	5,56	51,3	54,8
4	40	35	10,1	35	28	7	57	3,96	89,3	144,0
5	35	33	9,5	36	28	8	53	3,68	29,3	173,3
6	33	27	9,3	37	28	9	50	3,55	19,3	192,5
7	27	25	8,4	39	29	10	45	3,21	41,0	233,5
8	25	23	8,3	41	31	10	38	3,01	34,8	268,3
9	23	20	6,4	44	30	14	36	3,59	19,3	287,5
10	20	15	4,1	45	26	19	31	4,88	115,0	402,5
11	15	9,5	3,7	46	26	20	18	4,05	211,8	614,3
12	9,5	9	7,2	38	26	12	38	1,32	362,8	977,0
13	9	9	7,2	38	26	12	36	1,25	24,0	1001

3.2.3 Izračuni stroškov sušenja

3.2.3.1 Stroški infrastrukture

Izračuni stroškov ureditve podstavka za sušilne komore

Za izračun stroškov ureditve podstavka s temelji, nad katerim bo urejena montažna sušilna komora, smo dobili iz projektantskega predračuna. Po projektantski oceni vrednost GOI znaša 180 € za m² bruto površine. Gradbeno - obrtniška dela znesejo 247 € za m² bruto površine. Med gradbeno – obrtniška dela štejejo: Gradbena jama (izkop gradbene jame, zavarovanje gradbene jame, zadrževanje nivoja podtalnice) katere vrednost znaša 27 € po m², temeljenje in plošča nad tlemi v vrednosti 220 € po m². Skupna vrednost priprave podstavka za sušilno komoro znaša 427 € na m².

Za izračun nabavne vrednosti podstavkov za sušilne komore smo uporabili enačbo:

$$NV_{podst.} = A_s \times C_{podst.} \times N_{kom.} \quad \dots(2)$$

kjer je:

$NV_{podst.}$nabavna vrednost priprave podstavka za sušilne komore (€)

A_spovršina ene sušilne komore (m^2)

$C_{podst.}$cena m^2 podstavka sušilne komore (€/m²)

$N_{kom.}$število potrebnih sušilnih komor

Nabavno vrednost vrednotimo kot izdatek podjetja. Da lahko izdatke stroškovno ovrednotimo, moramo izračunati amortizacijo.

Strošek amortizacije je vrednostno izražena poraba oz. izraba sredstva v določenem časovnem obdobju. Poznamo 3 skupine metod amortizacije: časovne metode amortiziranja, funkcionalne metode amortiziranja in kombinirane metode amortiziranja.

Časovno metodo se uporablja v primerih ko delovno sredstvo izgublja vrednost predvsem zaradi zunanjih dejavnikov. Ekonomska življenjska doba delovnega sredstva ni odvisna od intenzivnosti uporabe delavnega sredstva v proizvodnem procesu. Znesek amortizacije je pri tej metodi neodvisen od obsega proizvodnje, amortizacija na enoto proizvoda pa s povečevanjem obsega proizvodnje pada.

Funkcionalna metoda amortiziranja temelji predvsem na predpostavki, da delovno sredstvo izgublja vrednost predvsem zaradi notranjih dejavnikov. Vrednost amortizacije se pri funkcionalni metodi določi glede na predvideno število proizvedenih proizvodov v dobi koristnosti delovnega stroja. Znesek amortizacije na proizvod je ves čas enak, medtem ko se celoten znesek amortizacije z večanjem proizvodnje zmanjšuje.

Metodo amortiziranja izberemo glede na predpostavko o tem kako delovno sredstvo izgublja svojo vrednost (jo prenaša na poslovni učinek) znotraj ocenjene dobe koristnosti.

Pri izračunu amortizacije smo uporabili kombinirano metodo amortiziranja. Najprej smo z časovno metodo izračunali letno amortizacijo, nato pa smo z funkcionalno metodo izračunali amortizacijo na m³ posušenega lesa.

$$Am_{podst.} = \frac{NV_{podst.}}{25 \text{ let} \times Q_L} \quad \dots(3)$$

kjer je:

$Am_{podst.}$vrednost letne amortizacije ureditve podstavka za sušilno komoro (€/m³)

$NV_{podst.}$nabavna vrednost priprave podstavka za sušilne komore (€)

Q_Lletna kapaciteta lesnopedelovalnega obrata (m³/leto)

Izračun stroškov izgradnje temperirnic

Površina temperirnice je iste velikosti kot sušilna komora. Stroški izgradnje temperirnic, pripadajočih k sušilnim komoram, smo pridobili iz projektantskega predračuna. Po oceni projektanta znaša vrednost GOI za m² bruto površine temperirnice 20 €. Gradbeno – obrtniška dela, kamor spadajo: Gradbena jama (izkop gradbene jame, zavarovanje gradbene jame, zadrževanje nivoja podtalnice) v vrednosti 6 €/m², temeljenje in plošča nad tlemi v vrednosti 60 €/m², zunanje stene (nenosilne in nosilne stene ter stebri, stenske obloge, zunanja vrata) v vrednosti 100 €/m², streha (strešna konstrukcija – ostrešje, kritina, strešna hidro in termoizolacija, odvodnjavanje) v vrednosti 30 €/m². Skupna vrednost izgradnje temperirnic znaša 216 €/m².

Nabavno vrednost izgradnje temperirnic smo izračunali po enačbi:

$$NV_{temp.} = A_s \times C_{temp.} \times N_{kom.} \quad \dots(4)$$

kjer je:

NV_{temp.}.....nabavna vrednost izgradnje temperirnice (€)

A_s.....površina ene sušilne komore (m²)

C_{temp.}.....cena izgradnje m² temperirnice (€/m²)

N_{kom.}.....število potrebnih temperirnic

Amortizacijska doba izgradenj temperirnic znaša 25 let. Izračunali smo jo po enačbi 3.

Izračun stroškov ureditve prostora za pripravo lesa

Potrebna površina prostora za pripravo lesa je enaka kvadraturi sušilne komore. Podatke za izračun stroškov priprave in asfaltiranja prostora za pripravo lesa smo pridobili od podjetja Asfalti Ptuj d.o.o., ki nam je posredovalo naslednje podatke: Cena priprave zemljišča (tampon, izravnava) znaša 16 €/m², polaganje 7 cm debele asfaltne podlage, pa stane 24 €/m².

Nabavno vrednost ureditve prostora za pripravo lesa smo izračunali po enačbi:

$$NV_{asf.} = A_s \times C_{asf.} \times N_{kom.} \quad \dots(5)$$

kjer je:

NV_{asf.}.....nabavna vrednost ureditve prostora za pripravo lesa (€)

A_s.....površina ene sušilne komore (m²)

C_{asf.}.....cena ureditve m² prostora za pripravo lesa (€/m²)

N_{kom.}.....število potrebnih sušilnih komor

Amortizacijska doba ureditve prostora za pripravo lesa znaša 25 let. Izračunali smo jo po enačbi 3.

Izračun stroškov nakupa sušilnih komor

Nabavno vrednost nakupa in postavitve sušilne komore smo izračunali po enačbi:

$$NV_s = C_s \times N_{kom.} \quad \dots(6)$$

kjer je:

NV_snabavna vrednost nakupa in postavitve sušilne komore (€)

C_scena in postavitve sušilne komore (€)

$N_{kom.}$število potrebnih sušilnih komor

Amortizacijska doba sušilnih komor znaša 15 let. Izračunali smo jo po enačbi 3.

Izračun stroškov vzdrževanja infrastrukture

Stroški letnega vzdrževanja infrastrukture so izraženi v naslednjih odstotkih od začetne investicije: vzdrževanje temperirnic znaša 1 % od začetne investicije v izgradnjo temperirnic, vzdrževanje zemljišč znaša 1 %, vzdrževanje komor znaša 4 %. Stroške vzdrževanja na m^3 lesa smo izračunali po naslednji enačbi:

$$S_{main.} = \frac{(0,01 \times NV_{temp.}) + (0,01 \times NV_{asf.}) + (0,04 \times NV_s.)}{Q_L} \quad \dots(7)$$

kjer je:

$S_{main.}$skupni stroški vzdrževanja infrastrukture (€/m³)

Stroški zavarovanja infrastrukture

Stroški zavarovanja, po podatkih Zavarovalnice Maribor, znašajo okvirno 5 % vrednosti celotne začetne investicije. Celotne stroške zavarovanja sušilnih komor in temperirnic smo izračunali na m^3 lesa, po enačbi:

$$S_{zav.} = \frac{0,05 \times (NV_{temp.} + NV_s.)}{Q_L} \quad \dots(8)$$

kjer je:

$S_{zav.}$skupni stroški zavarovanja infrastrukture (€/m³)

3.2.3.2 Stroški priprave lesa

Strošek letvičenja in razletvičenja

V $1,2 \text{ m}^3$ se letviči oz. razletviči v 1 delovni uri (Mrak, 1988). Bruto osebni dohodek delavca znaša 4,2 €/h in je preračunan iz minimalne bruto plače (za Junij 2010) pri 176 delovnih urah mesečno. Za letvičenje oz. razletvičenje zložajev, pa sta potrebna najmanj 2 delavca. Stroške letvičenja in razletvičenja se izračunajo po formuli:

$$S_{\text{let.}} = \frac{OD_{\text{del.}} \times X_{\text{del.}}}{1,2 \text{ m}^3} \quad \dots(9)$$

kjer je:

$S_{\text{let.}}$skupni strošek bruto dohodka delavca (€/m³)

$X_{\text{del.}}$število potrebnih delavcev

$OD_{\text{del.}}$bruto osebni dohodek delavca na uro (€/h)

Režijski stroški priprave lesa

Režijski stroški priprave lesa okvirno znašajo 60 % bruto osebnega dohodka delavcev udeleženih pri letvičenju in razletvičenju zložajev (Mrak, 1988).

Stroški transporta z viličarjem

Čas vožnje iz skladišča do sušilne komore v povprečju traja 3 minute, k temu pa je potrebno prišteti še 1,5 minute za polnjenje in enak čas za praznjenje viličarja. (Mrak, 1988). Skupen čas uporabe viličarja za prevoz enega paketa iz skladišča v sušilno komoro traja v povprečju 6 min. Izračun stroškov smo opravili na primeru sodobnega viličarja Still R70 z nosilnostjo 4,5 t. Poraba tega viličarja po specifikacijah znaša 3,6 l dizelskega goriva v eni delovni uri. Cena litra dizelskega goriva znaša 0,98 € brez DDV (10.8.2010). Bruto osebni dohodek voznika viličarja (minimalna plača), pa na uro znesi 4,2 €. Za izračun stroškov na m³ lesa, se je uporabil podatek o volumnu lesa v zložaju (Q_z), ki znaša 3,47 m³. Stroške transporta zložajev z viličarjem na m³ transportiranega lesa, smo izračunali po enačbi:

$$S_{\text{vil.}} = \frac{t_{\text{vil.}} \times ((P_{\text{vil.}} \times C_{\text{diz.}}) + OD_{\text{vil.}})}{Q_z} \quad \dots(10)$$

kjer je:

$Cost_{\text{vil.}}$stroški transporta z viličarjem (€/m³)

$t_{\text{vil.}}$čas transporta z viličarjem (h)

$P_{\text{vil.}}$poraba viličarja (l/h)

$C_{\text{diz.}}$cena dizelskega goriva (€/l)

Q_z volumen lesa v enem zložaju (m³)

$OD_{\text{vil.}}$ bruto osebni dohodek voznika viličarja (€/h)

Stroški nadzora in kontrole sušenja

Vodenje in nadzor sušilnih postopkov je v lesarskih podjetjih zaupano zaposlenemu tehnologu z ustrežno izobrazbo. V teh izračunih sem uporabil začetno bruto plačo delavca v lesarskem sektorju z VI. Stopnjo izobrazbe, ki znaša 1055 € neto. Strošek nadzora in kontrole na m³ lesa se izračuna po formuli:

$$S_{nk.} = \frac{12 \times OD_{suš.}}{Q_L} \quad \dots(11)$$

kjer je:

$S_{nk.}$strošek nadzora in kontrole sušilnega postopka (€/m³)

$OD_{suš.}$osebni dohodek zaposlenega tehnologa - sušilničarja (€/mesečno)

Q_Lletna kapaciteta lesnopredelovalnega obrata (m³/leto)

3.2.3.3 Stroški energije

Strošek toplotne energija

- **Konvekcijsko sušenje**

Podatki o porabi toplotne energije pri konvekcijskem sušenju so bili pridobljeni CAE modelom. Uporabljeni podatki o ceni kWh toplotne energije so bili pridobljeni od podjetja Energoles – Bohor d.o.o., ki se ukvarja z pridobivanjem toplotne energije iz lesne biomase in jo prodaja poslovnim partnerjem po ceni 0,06 €/kWh (10.8.2010). Strošek porabe toplotne energije pri konvekcijskem sušenju na m³ lesa smo izračunali po enačbi:

$$S_{top.} = \frac{E_{top.} \times C_{top.}}{Q_S} \quad \dots(12)$$

kjer je:

$S_{top.}$strošek porabljene toplotne energije (€/m³)

$E_{top.}$porabljena toplotna energija (kWh)

$C_{top.}$cena toplotne energije (€/kWh)

Q_Skapaciteta sušilne komore (m³)

Strošek električne energije

- **Konvekcijsko sušenje**

Podatki o porabljeni električni energiji pri konvekcijskem sušenju so bili prav tako pridobljeni s pomočjo CAE modela. Cena kWh električne energije za večje industrijske uporabnike, pri podjetju Elektro Maribor d.d. znaša 0,10 €/kWh (10.8.2010). Strošek porabljene električne energije pri konvekcijskem sušenju na m³ lesa smo izračunali po enačbi:

$$S_{el.} = \frac{E_{el.} \times C_{el.}}{Q_S} \quad \dots(13)$$

kjer je:

S_{el.}.....strošek porabljene električne energije (€/m³)

E_{el.}.....porabljena električna energija (kWh)

C_{el.}.....cena električne energije (€/kWh)

Q_Skapaciteta sušilne komore (m³)

- **Kondenzacijsko sušenje**

Podatki o porabljeni električni energiji pri kondenzacijskem sušenju so bili pridobljeni z izvedenim eksperimentalnim sušenjem v manjši kondenzacijski komori. Strošek porabljene električne energije pri kondenzacijskem sušenju na m³ lesa smo izračunali po enačbi 13.

3.2.3.4 Izračun skupnih stroškov sušenja

Skupni stroški sušenja na m³ ustrezajo vsoti vseh delnih stroškov sušenja izraženih v € na m³ lesa. Skupne stroške sušenja smo nato delili s skupnim časom sušenja, rezultat so stroški sušenja kubičnega metra lesa na uro.

3.2.3.5 Izračun stroškov sušenja v odvisnosti od padca lesne vlažnosti

Kolikšni so stroški padca lesne vlažnosti za 1 % smo izračunali tako, da smo strošek sušenja na uro po m³ delili z sušilno hitrostjo (du/dt):

$$S_{\%} = \frac{S_{uro}}{\left(\frac{\Delta u}{\Delta t}\right)} \quad \dots(14)$$

kjer je:

S_%.....strošek padca lesne vlažnosti za 1 % (€/%)

S_{uro}.....strošek sušenja lesa na uro (€/h)

Δu.....sprememba lesne vlažnosti v intervalu (%)

Δt.....trajanje intervala merjenja spremembe vlažnosti (h)

4 REZULTATI

4.1 KAPACITETE SUŠENJA IN POTREBNE VELIKOSTI KOMOR

Kapaciteta izbranih sušilnic je enaka pri konvencionalnem in kondenzacijskem sušenju. Da pri kondenzacijskem sušenju zadostimo letnim kapacitetam 20 000 m³ žaganega lesa, potrebujemo 23 sušilnih komor kapacitete 125 m³ žaganega lesa. Za doseg enakih kapacitet, pri konvencionalnem sušenju potrebujemo le 9 sušilnih komor. Vzrok za takšno razliko, so precej daljši časi kondenzacijskega sušenja v primerjavi s konvencionalnim sušenjem (Pregl. 8).

Preglednica 8 Glavne karakteristike sušilnega postroja

	Konvencionalno sušenje	Kondenzacijsko sušenje
Vrsta lesa	Bukev 50 mm	Bukev 50 mm
Celoten čas sušenja	408,7 h / 17,3 dni	1011,5 h / 42,14 dni
Začetna vlažnost	60%	57,40%
Končna vlažnost	8%	8,30%
Letna kapaciteta obrata	20 000 m ³	20 000 m ³
Volumen lesa v zložaju	3,5 m ³	3,5 m ³
Število zložajev v eni komori	36	36
Število ciklov sušenja enem letu	18	7
Število komor (enake velikosti)	9	23
Volumen lesa v eni komori	125 m ³	125 m ³
Volumen lesa v enem ciklu sušenja	1125 m ³	2875 m ³
Površina sušilne komore	100 m ²	100 m ²
Površina prostora za pripravo lesa	100 m ²	100 m ²
Površina temperilnice	100 m ²	100 m ²

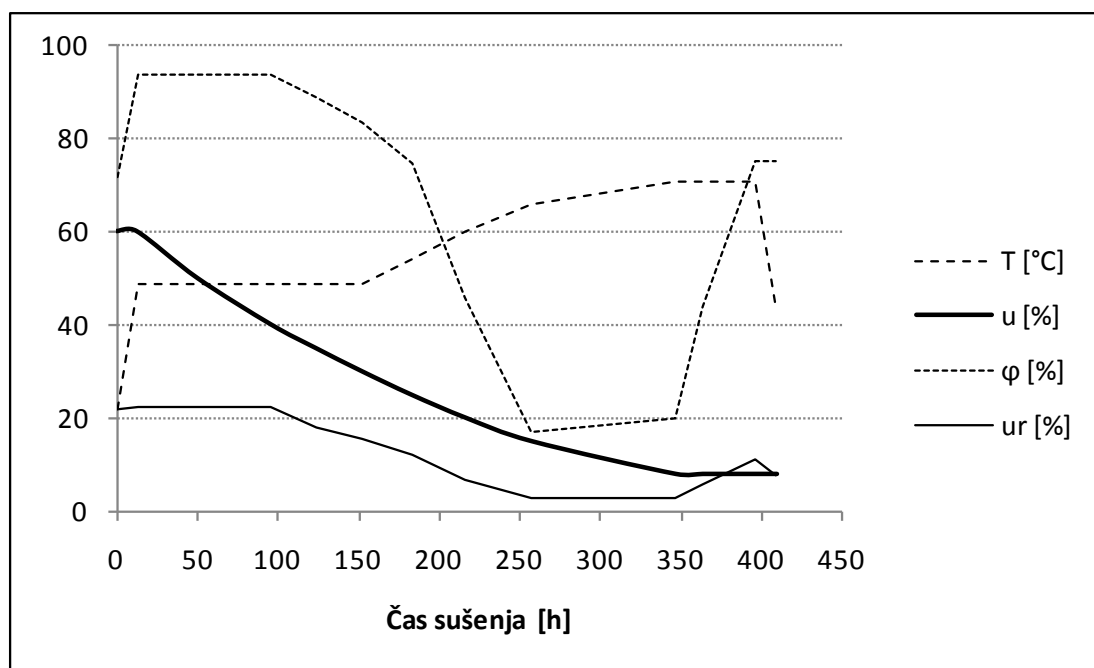
4.2 KINETIKA SUŠENJA

4.2.1 Konvencionalno sušenje

Vsi podatki o kinetiki sušenja so bili pridobljeni z računalniško simulacijo konvekcijskega sušenja s pomočjo CAE modela.

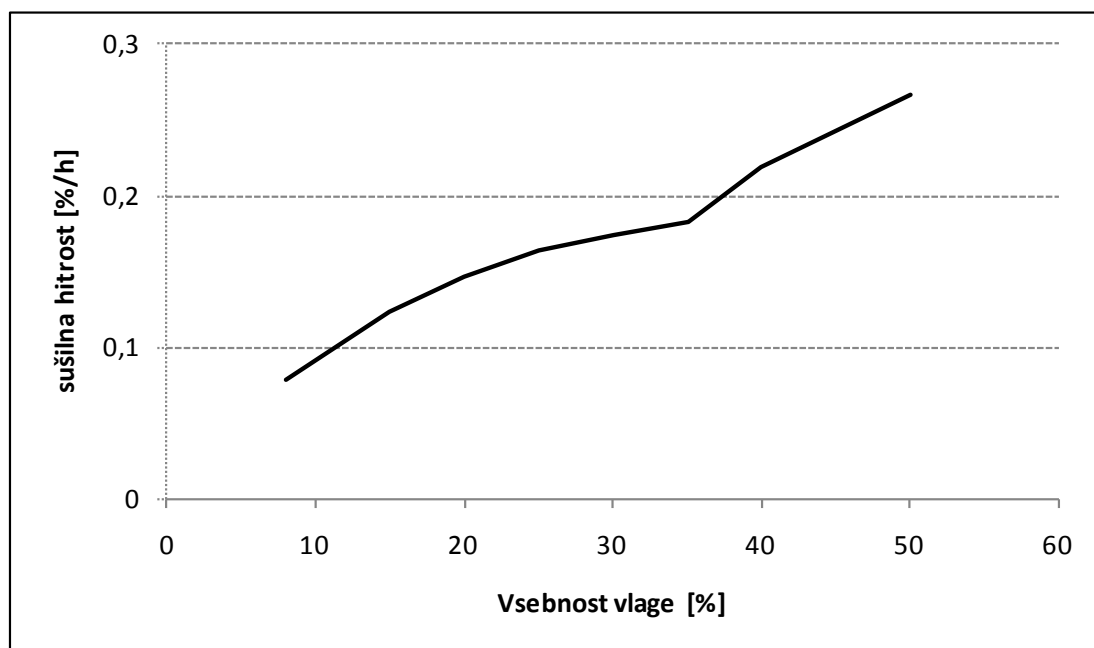
Simulacija sušenja bukovine v konvekcijski komori je bila izvedena na podlagi Ameriškega režima (Pregl. 6).

Sušenje iz predpostavljene začetne vlažnosti 60 % do končne lesne vlažnosti 8 %, v simulaciji traja 408,7 ur, oziroma 17,3 dni. Skupni čas sušenja sestavlja 12,5 ur segrevanja, 333,7 ur sušenja, 16,7 ur izenačevanja, 33,4 ur kondicioniranja in 12,5 ur ohlajanja. Gibanje temperature, relativne zračne vlažnosti, lesne vlažnosti in ravnovesne vlažnosti je natančno prikazano na Sliki 8.



Slika 8 Sušilni diagram (temperatura T , relativna zračna vlažnost φ , ravnovesna vlažnost u_r) in sušilna krivulja za 50 mm debel žagan les bukovine.

Sušilna hitrost je najvišja na začetku sušilnega postopka in nato linearno pada do lesne vlažnosti 40 %. Po tem opazimo strmejši padec sušilne hitrosti, ki se umiri pri lesni vlažnosti 35 %, kar sovпада z dvigom temperature. Sušilna hitrost nato začne zopet hitreje upadati, ko lesna vlažnost doseže 20 %.

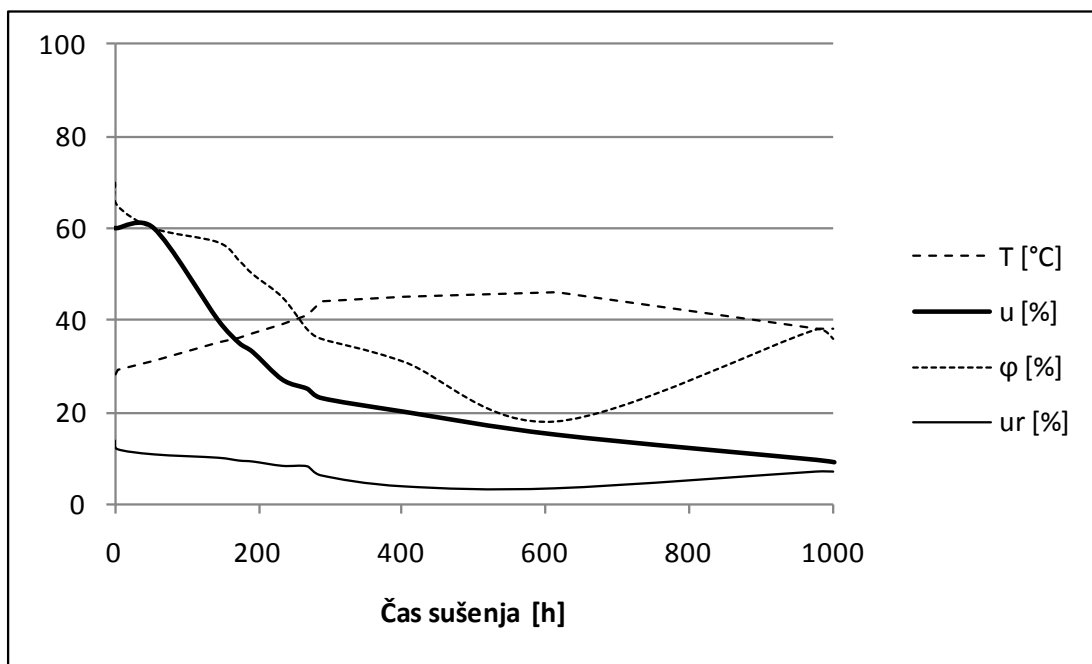


Slika 9 Odvisnost sušilne hitrosti od lesne vlažnosti za 50 mm debelo bukovino.

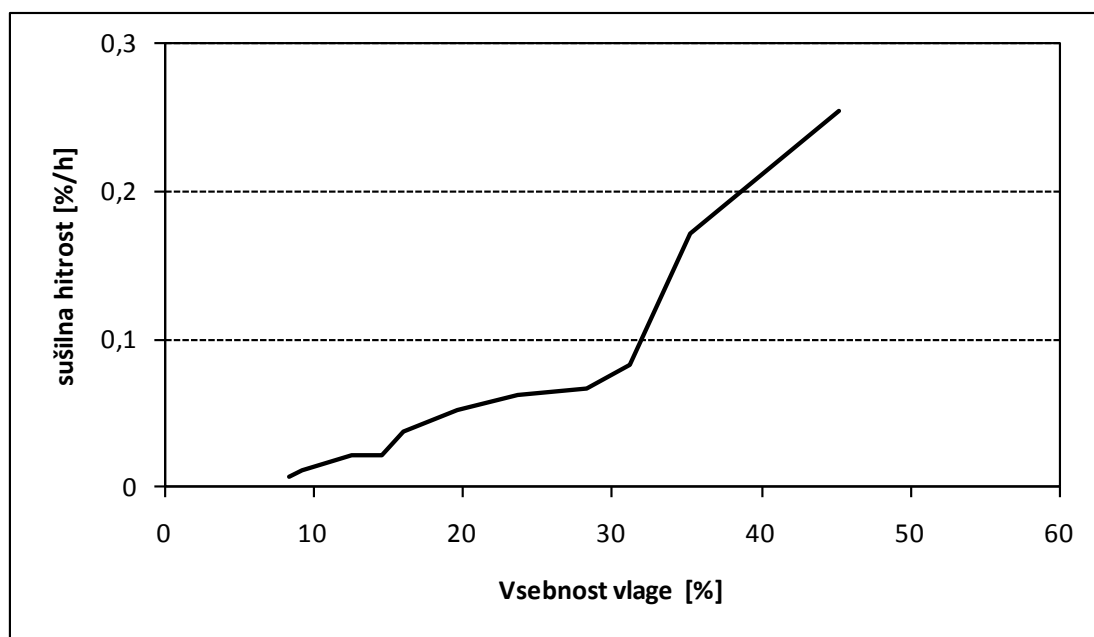
4.2.2 Kondenzacijsko sušenje

Podatki o kinetiki kondenzacijskega sušenja so bili pridobljeni z eksperimentalnim sušenjem. Sušenje se je izvajalo načrtovanem programu (Pregl. 7)

Kondenzacijsko sušenje iz začetne vlažnosti 57,4 % do končne lesne vlažnosti 8,3 % je trajalo 1011,5 ur, oziroma 42,14 dni. Gibanje temperature, relativne zračne vlažnosti, lesne vlažnosti in ravnovesne vlažnosti je natančneje prikazano na Sliki 10.



Slika 10 Sušilni diagram (temperatura T , relativna zračna vlažnost ϕ , ravnovesna vlažnost u_r) in sušilna krivulja za 50 mm debel žagan les bukovine.



Slika 11 Odvisnost sušilne hitrosti od lesne vlažnosti za 50 mm debelo bukovino.

Sušilna hitrost je največja na začetku sušenja in nato linearno pada do vrednosti lesne vlage 35 %, kjer začne hitrost sušenja hitro upadati do lesne vlažnosti 31 %, kjer znaša hitrost sušenja le še 0,08 %/h. Do konca sušenja se nadaljuje nekoliko počasnejši trend upadanja hitrosti sušenja, ki se konča pri vrednosti 0,008 %/h.

4.3 PORABA ENERGIJE

Opazna je razlika v trajanju sušenja, saj le to pri kondenzacijskem poteka skoraj 2,5 krat dlje kot pri konvencionalnem (Pregl. 9). Specifična poraba energije je prav tako višja pri kondenzacijskem postopku in znaša 2,15 kWh na kg izločene vode. Pri konvekcijskem postopku sušenja je ta vrednost nekoliko nižja in znaša 1,16 kWh na kg izločene vode. Poraba energije na m³ lesa na uro, pa je pri konvekcijskem sušenju višja (0,85 kWh/m³h) kot pri kondenzacijskem postopku (0,63 kWh/m³h) (Pregl. 9).

Preglednica 9 Poraba energije pri konvekcijskem in kondenzacijskem sušenju

	Konvencionalno sušenje	Kondenzacijsko sušenje
Celoten čas sušenja	408,7 h / 17,3 dni	1011,5 h / 42,14 dni
Začetna vlažnost	60%	57,40%
Končna vlažnost	8%	8,30%
Skupna poraba energije	43378 kWh	4016 kWh
Poraba energije na uro	106,14 kWh/h	3,97 kWh/h
Specifična poraba na kg izločene vode	1,16 kWh/kg	2,15 kWh/kg
Poraba na m3 na uro	0,85 kWh/m3h	0,63 kWh/m3h

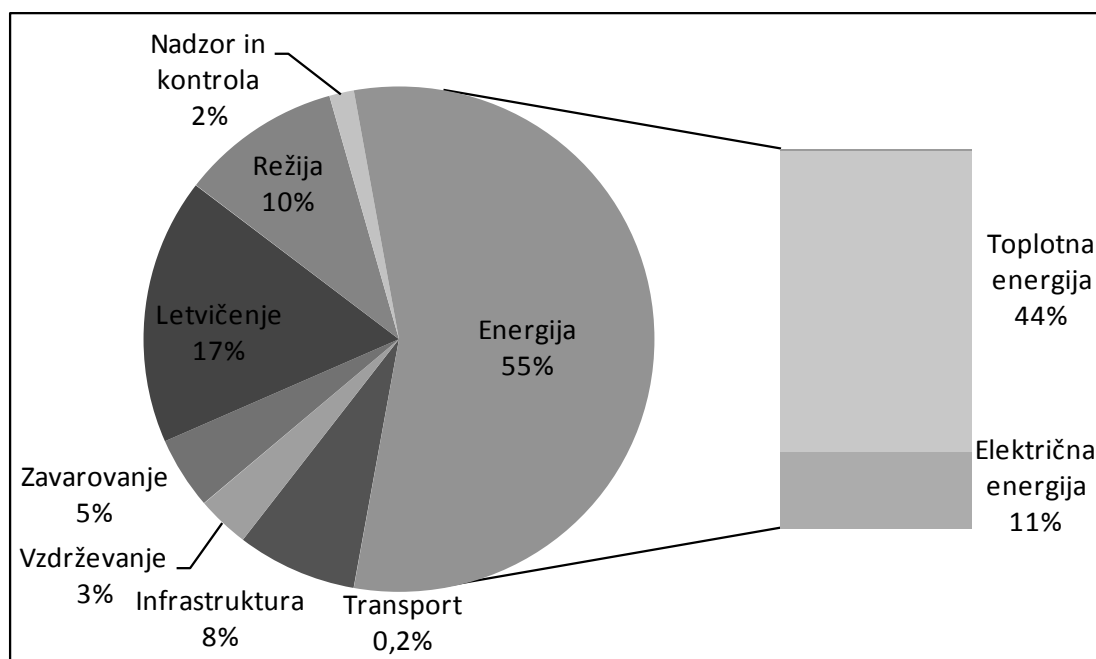
4.4 STROŠKI SUŠENJA

4.4.1 Konvekcijsko sušenje

Kot je razvidno iz Preglednice 10 in Slike 12 pri konvekcijskem sušenju največji strošek toplotna energija, ki skupaj z električno energijo tvori 55 % vseh stroškov konvekcijskega sušenja (Slika 12). Najmanjši, skoraj zanemarljiv del pripada stroškom nadzora in kontrole sušenja, ter transportnim stroškom uporabe viličarja, skupaj le slaba 2 %.

Preglednica 10 Struktura stroškov konvekcijskega sušenja

Stroški konvekcijskega sušenja	
<i>Nabavna vrednost ureditve zemljišča</i>	<i>420.202,12 €</i>
<i>Amortizacija ureditve zemljišča (25 let) na 1 m³ lesa</i>	<i>0,84 €</i>
<i>Nabavna vrednost postavitve temperilnic</i>	<i>176.358,92 €</i>
<i>Amortizacija temperilnic (25 let) na 1 m³ lesa</i>	<i>0,35 €</i>
<i>Vrednost sušilnih komor</i>	<i>580.545,00 €</i>
<i>Amortizacija sušilnih komor (15 let) na 1 m³ lesa</i>	<i>1,94 €</i>
<i>Vzdrževanje temperilnic (1 %)</i>	<i>1.763,59 €</i>
<i>Vzdrževanje zemljišč (1 %)</i>	<i>4.202,02 €</i>
<i>Vzdrževanje komor (4 %)</i>	<i>23.221,80 €</i>
<i>Vzdrževanje na 1 m³ lesa</i>	<i>1,37 €</i>
<i>Stroški zavarovanja komore in temperilnice (5 % na osnovo)</i>	<i>37.845,20 €</i>
<i>Zavarovanje na 1 m³ lesa</i>	<i>1,89 €</i>
<i>Letvičenje na m³</i>	<i>7,00 €</i>
<i>Režijski stroški (60 % letvičenje) na m³</i>	<i>4,20 €</i>
<i>Nadzor in kontrola sušenja na leto</i>	<i>12.660,00 €</i>
<i>Strošek Nadzora in kontrole sušenja na leto na m³ lesa</i>	<i>0,63 €</i>
<i>Transportni stroški na m³ lesa</i>	<i>0,22 €</i>
<i>Strošek kWh toplotne energije iz sekancev</i>	<i>0,06 €</i>
<i>Stroški toplotne energije na m³ lesa</i>	<i>18,14 €</i>
<i>Stroški porabljene električne energije m³ lesa</i>	<i>4,54 €</i>
Stroški sušenja na m³ lesa	41,12 €
Stroški sušenja na m³ na uro sušenja	0,10 €



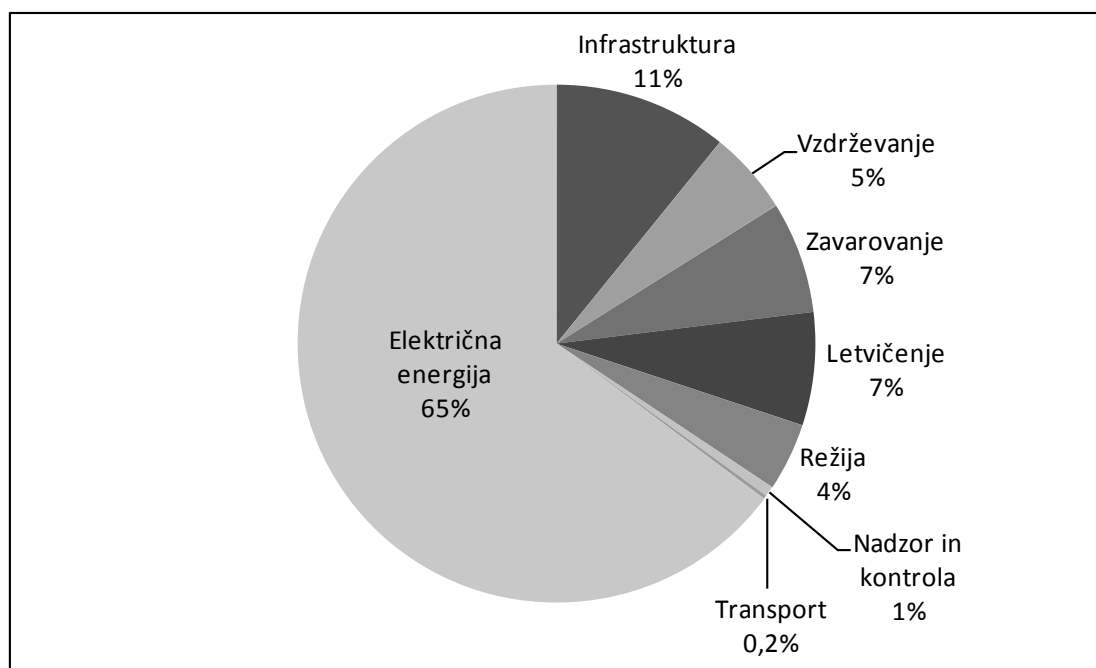
Slika 12 Prikaz deleža različnih stroškov pri konvencionalnem postopku

4.4.2 Kondenzacijsko sušenje

Največji strošek kondenzacijskega sušenja je poraba električne energije (Pregl. 11 in Slika 13). Sama poraba električne energije pri kondenzacijskem sušenju znaša 65 % vseh stroškov (Slika 14).

Preglednica 11 Struktura stroškov kondenzacijskega sušenja

Stroški kondenzacijskega sušenja	
<i>Nabavna vrednost ureditve zemljišča</i>	1.074.057,41 €
Amortizacija ureditve zemljišča (25 let) na 1 m ³ lesa	2,15 €
<i>Nabavna vrednost postavitve temperilnic</i>	450.782,12 €
Amortizacija temperilnic (25 let) na 1 m ³ lesa	0,90 €
<i>Vrednost sušilnih komor</i>	2.310.005,00 €
Amortizacija sušilnih komor (15 let) na 1 m ³ lesa	7,70 €
<i>Vzdrževanje temperilnic (1 %)</i>	4.507,82 €
<i>Vzdrževanje zemljišč (1 %)</i>	10.740,57 €
<i>Vzdrževanje komor (4 %)</i>	92.400,20 €
Vzdrževanje na 1 m ³ lesa	5,16 €
<i>Stroški zavarovanja komore in temperilnice (5 % na osnovo)</i>	138.039,36 €
Zavarovanje na 1 m ³ lesa	6,90 €
Letvičenje na m ³	7,00 €
Režijski stroški (60 % letvičenje) na m ³	4,20 €
<i>Nadzor in kontrola sušenja na leto</i>	12.660,00 €
Strošek Nadzora in kontrole sušenja na leto na m ³ lesa	0,63 €
Transportni stroški na m ³ lesa	0,22 €
<i>Strošek kWh toplotne energije iz sekancev</i>	0,06 €
Stroški toplotne energije na m ³ lesa	- €
Stroški porabljene električne energije m ³ lesa	64,15 €
Stroški sušenja na m³ lesa	99,01 €
Stroški sušenja na m³ na uro sušenja	0,10 €



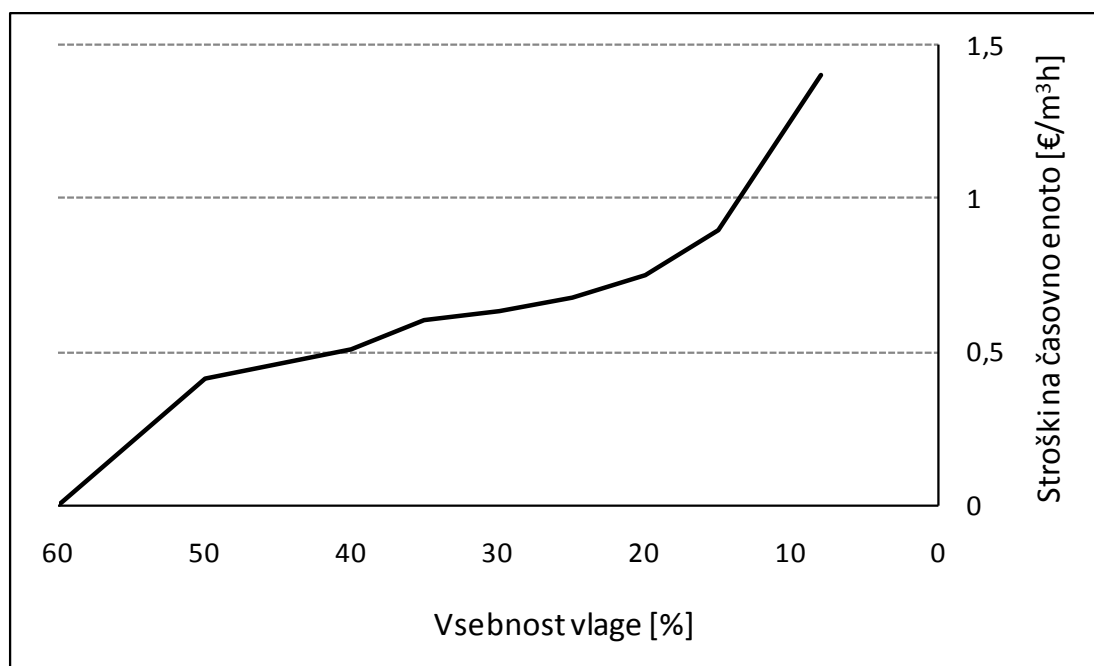
Slika 13 Prikaz deleža različnih stroškov pri kondenzacijskem postopku

4.5 ODVISNOST STROŠKOV SUŠENJA OD LESNE VLAŽNOSTI

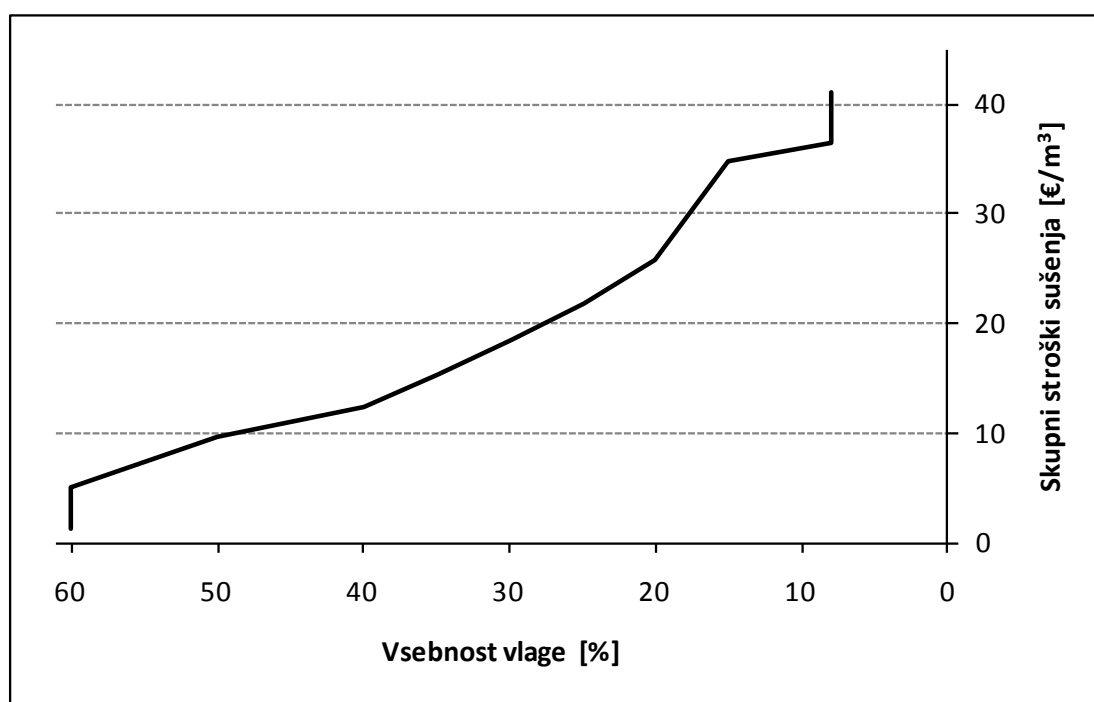
Za primerjavo gibanja stroškov sušenja skozi ves cikel tako konvencionalnega kot kondenzacijskega postopka smo uporabili odvisnost stroškov od lesne vlažnosti, ki nam predstavi, kolikšen je strošek osušitve surovine za 1 % lesne vlažnosti

4.5.1 Konvekcijsko sušenje

Strošek, ki je potreben za osušitev lesa za 1 % lesne vlažnosti oziroma specifični strošek sušenja na % lesne vlažnosti, je v največji meri odvisena od sušilne hitrosti in posledično režima sušenja (Slika 14). Specifični stroški v fazi sušenja med 60 in 50 % lesne vlažnosti hitro dosežejo vrednost okoli 0,4 €/%. Ta vrednost pa se nato do vlažnosti lesa 40 % le počasi povečuje in doseže vrednost 0,5 €/%. Trend hitrejše rasti celotnih stroškov sušenja (Slika 15) se pojavi v območju nasičenja celičnih sten. Najhitreje stroški sušenja rastejo pod 15 % lesne vlažnosti.



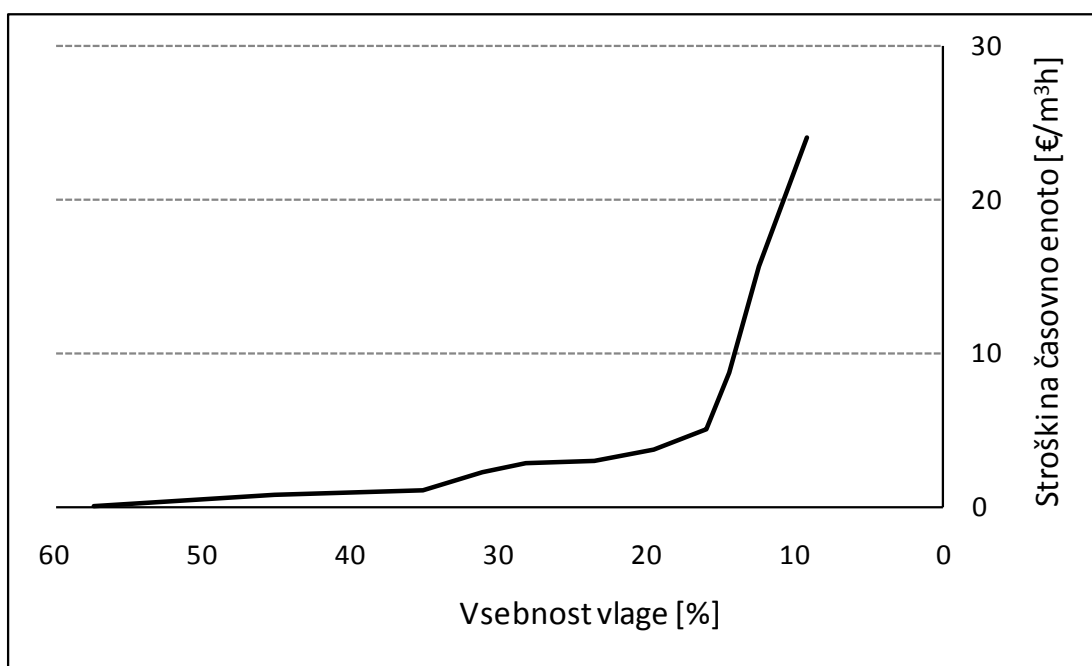
Slika 14 Stroški sušenja m^3 lesa na uro v odvisnosti od lesne vlažnosti pri konvekcijskem sušenju



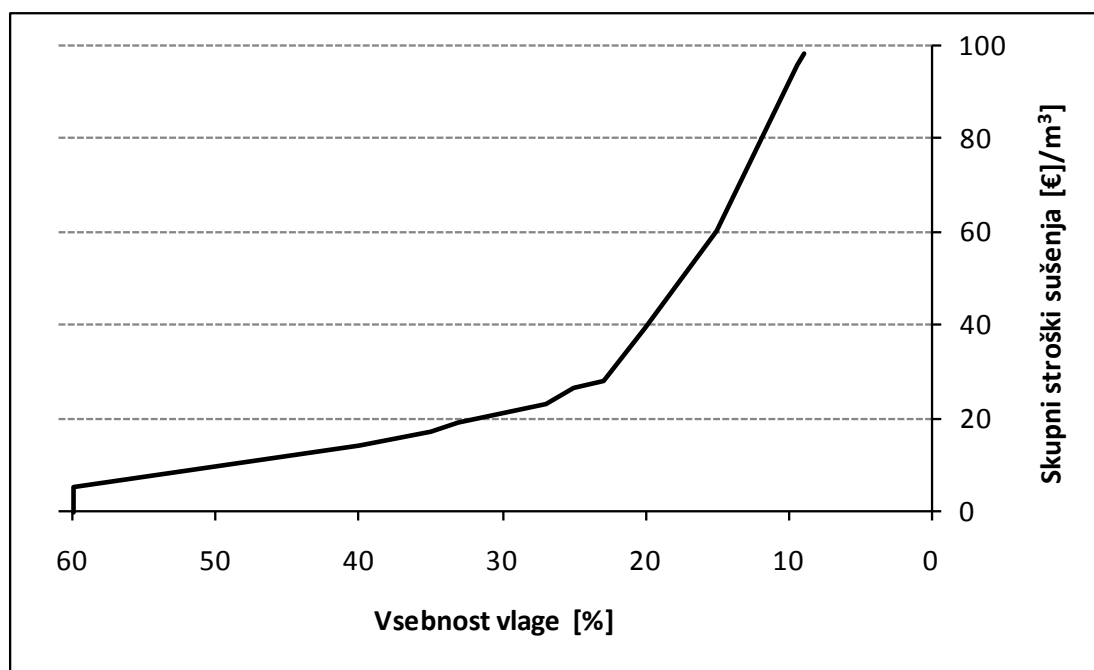
Slika 15 Rast skupnih stroškov pri konvencionalnem sušenju v odvisnosti od vlage

4.5.2 Kondenzacijsko sušenje

Stroški potrebni za osušitev lesa za 1 % lesne vlažnosti, pri kondenzacijskem sušenju, do lesne vlažnosti 35 % počasi in enakomerno rastejo. Pri tej vlažnosti se opazi prvi trend povečevanja specifičnih stroškov sušenja, ki pa se pri vlažnosti lesa 30 % nekoliko upočasni (Slika 16). Trend vnovičnega enakomernega povečevanja specifičnih stroškov se prekine pri lesni vlažnosti 20 %. Od te vlažnosti začnejo stroški sušenja lesa hitro rasti (Slika 17), sami specifični stroški na % lesne vlažnosti, pa se začne ekstremno povečevati pod vlažnostjo lesa 15 % (Slika 17).



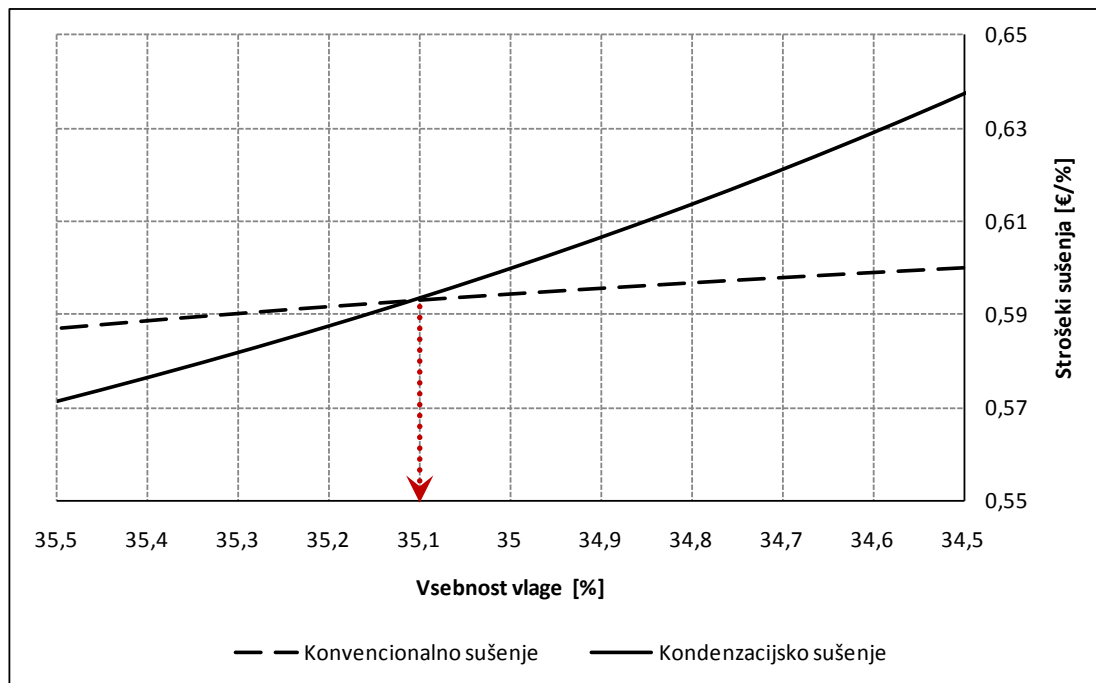
Slika 16 Strošek sušenja m³ lesa na uro v odvisnosti od lesne vlažnosti pri kondenzacijskem sušenju



Slika 17 Rast stroškov kondenzacijskega sušenja v odvisnosti od vlage

4.6 OPTIMIZACIJA

Točko optimalnega prehoda iz kondenzacijskega v konvencionalni sušilni postopek, smo določili z enačenjem izpeljav stroškovnih krivulj za kondenzacijski in konvencionalni postopek sušenja žaganega lesa. Točka optimalnega prehoda iz kondenzacijskega v konvekcijsko sušenje je presečišče obeh stroškovnih krivulj, to je pri lesni vlažnosti 35,1 % (Slika 18).



Slika 18 Metoda določitve točke optimalnega prehoda iz kondenzacijskega v konvekcijsko sušenje izračunana po enačbi 1.

Pri optimalnem kombiniranju kondenzacijskega in konvencionalnega sušilnega postopka (Pregl. 12), svež žagan les bukovine z začetno vlažnostjo 60 % v kondenzacijski sušilnici posušimo do lesne vlažnosti 35 %, nato pa les do končne vlažnosti 8 % dosušimo po konvencionalnem postopku. Za osušitev lesa na lesno vlažnost 35 % v kondenzacijski sušilnici potrebujemo 121 ur, oziroma 5 dni. Pri tako kratkem času sušenja, potrebujemo za dosego ciljne letne kapacitete 20 000 m³ žaganega lesa le 3 sušilne komore z kapaciteto 125 m³. Dosuševanje v konvencionalni sušilni komori traja 281,5 ur, oz. 11, 7 dni. Iz teh podatkov lahko hitro zaključimo, da potrebujemo za dosego letne kapacitete 6 konvencionalnih sušilnih komor. Celoten sušilni postroj torej vsebuje 6 konvencionalnih in 3 kondenzacijske sušilne komore.

Pri kondenzacijskem postopku sušenja lesa do ciljne vlažnosti 35 % porabimo 69,3 kWh električne energije na m³ žaganega lesa. Specifična porabljena energija pri kondenzacijskem postopku znaša 0,2 kWh na 1 kg izločene vode.

Za osušitev lesa po konvencionalnem postopku iz lesne vlažnosti 35 % do končne vlažnosti 8 % porabimo še dodatnih 180 kWh toplotne in 31,2 kWh električne energije na m³ lesa v sušilni komori. Specifična poraba energije na kilogram izločene vode je 1,35 kWh.

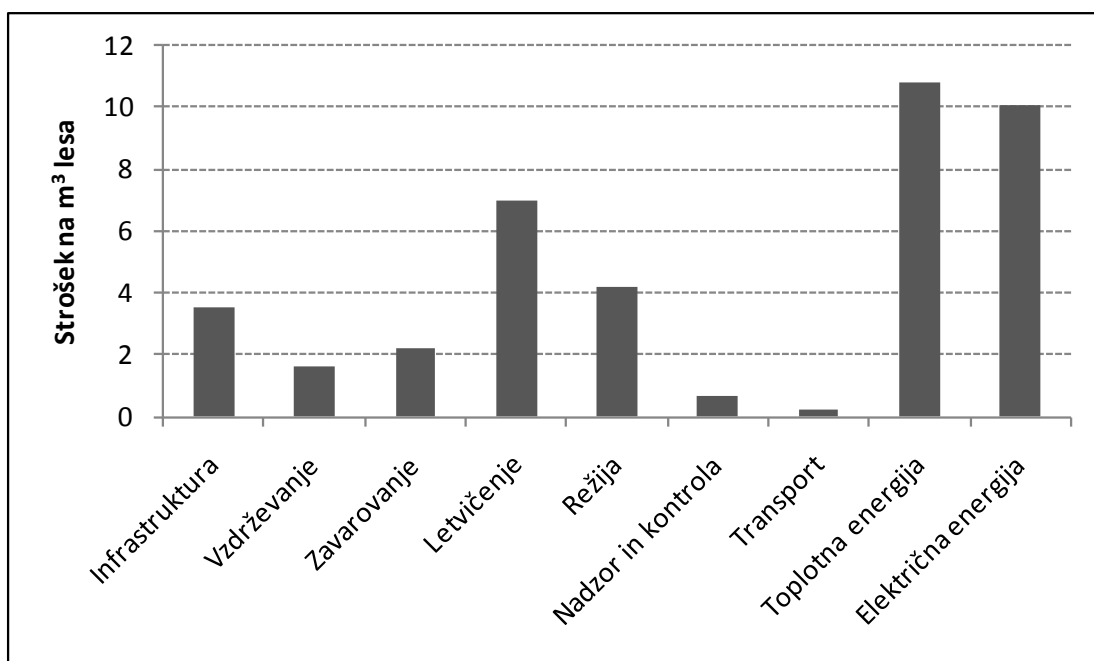
Preglednica 12 Glavne karakteristike sušilnega postroja pri kombiniranem sušenju

	Konvencionalno sušenje	Kondenzacijsko sušenje
Vrsta lesa	Bukev 50 mm	Bukev 50 mm
Celoten čas sušenja	281,5 h / 11,7 dni	121 h / 5 dni
Začetna vlažnost	35%	57,40%
Končna vlažnost	8%	35,20%
Letna kapaciteta obrata	20 000 m ³	20 000 m ³
Volumen lesa v zložaju	3,5 m ³	3,5 m ³
Število zložajev v eni komori	36	36
Število ciklov sušenja enem letu	27	54
Število komor (enake velikosti)	6	3
Volumen lesa v eni komori	125 m ³	125 m ³
Volumen lesa v enem ciklu sušenja	750 m ³	375 m ³
Površina sušilne komore	100 m ²	100 m ²
Površina prostora za pripravo lesa	100 m ²	100 m ²
Površina temperilnice	100 m ²	100 m ²

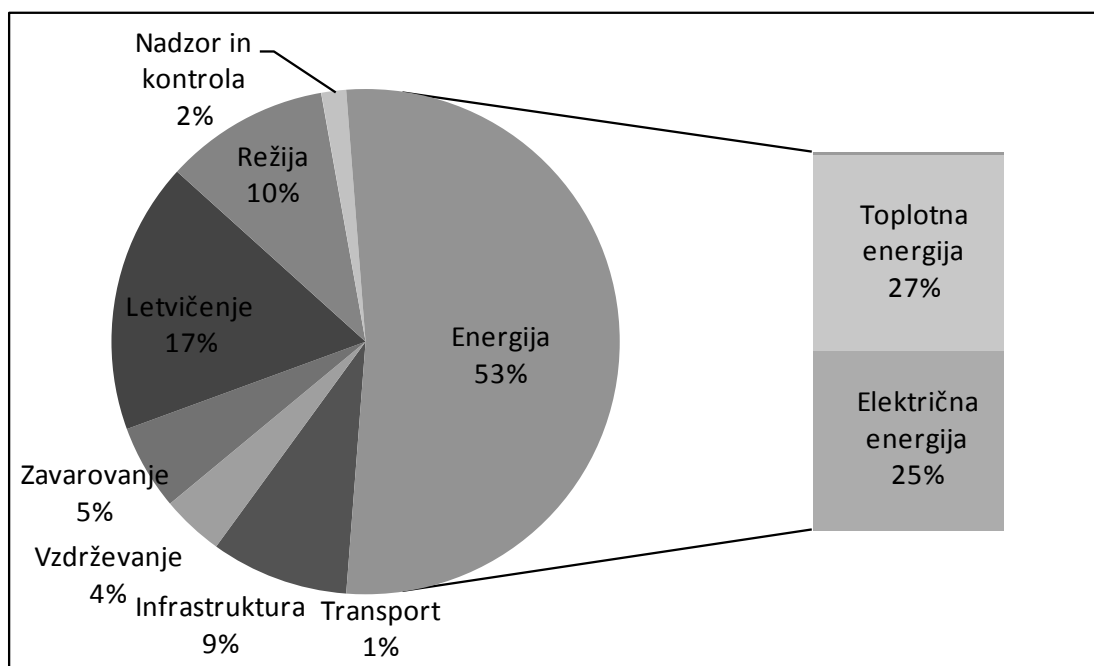
Iz strukture stroškov (Pregl. 13) je razvidno, da pri kombiniranem sušenju lesa v kondenzacijski in konvekcijski komori, strošek porabe toplotne in električne energije izenačen. Skupaj poraba energije pri kombiniranem sušenju znaša 52 % vseh stroškov.

Preglednica 13 Struktura stroškov pri kombiniranem sušenju

Optimalni stroški s kombinacijo konvekcijskega in kondenzacijskega sušenja	
<i>Nabavna vrednost ureditve zemljišča</i>	<i>421.603,12 €</i>
Amortizacija ureditve zemljišča (25 let) na 1 m ³ lesa	0,84 €
<i>Nabavna vrednost postavitve temperilnic</i>	<i>188.950,79 €</i>
Amortizacija temperilnic (25 let) na 1 m ³ lesa	0,38 €
<i>Vrednost sušilnih komor</i>	<i>688.335,00 €</i>
Amortizacija sušilnih komor (15 let) na 1 m ³ lesa	2,29 €
<i>Vzdrževanje temperilnic (1 %)</i>	<i>1.889,51 €</i>
<i>Vzdrževanje zemljišč (1 %)</i>	<i>4.216,03 €</i>
<i>Vzdrževanje komor (4 %)</i>	<i>27.533,40 €</i>
Vzdrževanje na 1 m ³ lesa	1,59 €
<i>Stroški zavarovanja komore in temperilnice (5 % na osnovo)</i>	<i>43.864,29 €</i>
Zavarovanje na 1 m ³ lesa	2,19 €
Letvičenje na m ³	7,50 €
Režijski stroški (60 % letvičenje) na m ³	4,50 €
<i>Nadzor in kontrola sušenja na leto</i>	<i>12.660,00 €</i>
Strošek Nadzora in kontrole sušenja na leto na m ³ lesa	0,63 €
Transportni stroški na m ³ lesa	0,22 €
<i>Strošek kWh toplotne energije iz sekancev</i>	<i>0,06 €</i>
Stroški toplotne energije na m ³ lesa	10,79 €
Stroški porabljene električne energije m ³ lesa	10,06 €
Stroški sušenja na m³ lesa	41,00 €
Stroški sušenja na m³ na uro sušenja	0,10 €



Slika 19 Prikaz strukture stroškov kombiniranega sušenja



Slika 20 Prikaz deleža različnih stroškov pri kombiniranem sušenju

5 RAZPRAVA

Vse rezultate simuliranega konvencionalnega sušenja in izvedenega kondenzacijskega sušenja smo podrobno analizirali. Cene opreme in surovin, ki so bile uporabljene pri izračunu stroškov sušenja, so realne in so bile pridobljene iz industrije.

Cikel sušenja lesa bukovine lahko razdelimo na dva dela. Na sušenje lesa nad točko nasičenja celičnih sten (TNCS) in sušenje lesa pod TNCS, ki se pri bukovini nahaja pri približni lesni vlažnosti 35 %.

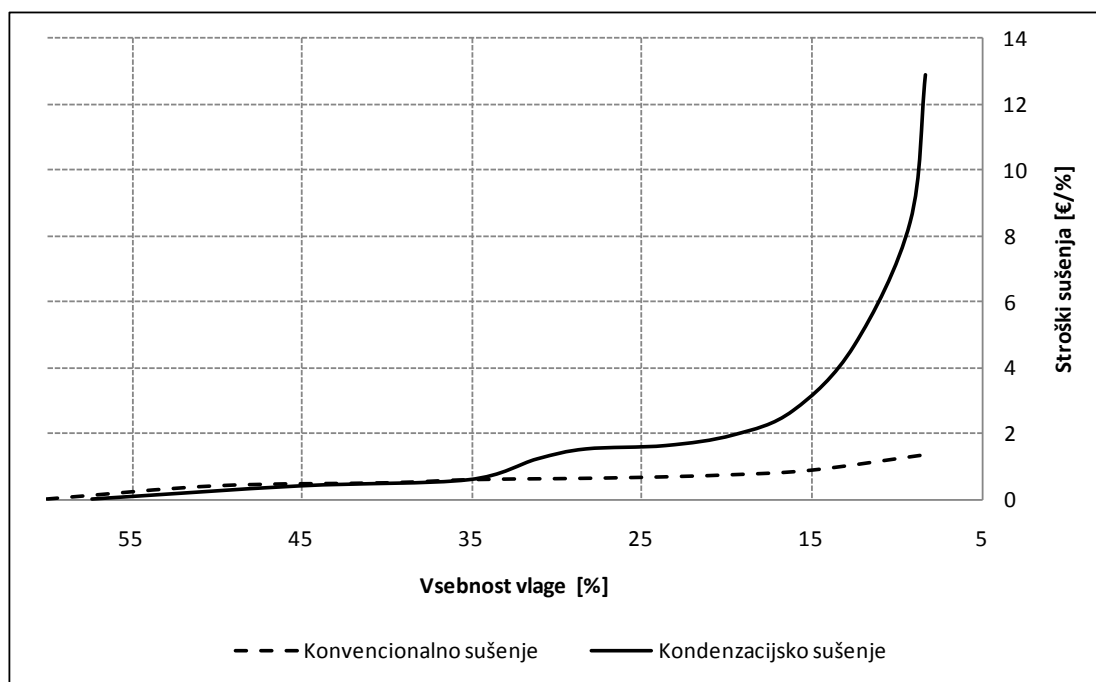
Pri sušenju lesa z visoko lesno vlažnostjo je kondenzacijski postopek energijsko ugodnejši (Pregl. 11). V našem primeru je poraba energije v vlažnostnem območju med 60 in 35 % lesne vlažnosti (nad TNCS) znašala 69,3 kWh na m³ lesa v sušilni komori. Specifična poraba energije na kg izločene vode, pa je le 0,20 kWh/kg (Pregl. 14).

Poraba energije pri konvencionalnem postopku je nad TNCS kar nekajkrat višja od porabe energije pri kondenzacijskem postopku. Nad TNCS se je pri sušenju po konvencionalnem postopku porabilo 162,8 kWh energije na m³ lesa v komori. Specifična poraba energije pa je znašala 1,13 kWh/kg.

Preglednica 14 Poraba energije v območju lesne vlažnosti med 60 % in 35 % (nad TNCS)

	Konvencionalno sušenje	Kondenzacijsko sušenje
Poraba energije na m³	162,8 kWh	69,3 kWh
Specifična poraba na kg izločene vode	1,13 kWh/kg	0,20 kWh/kg

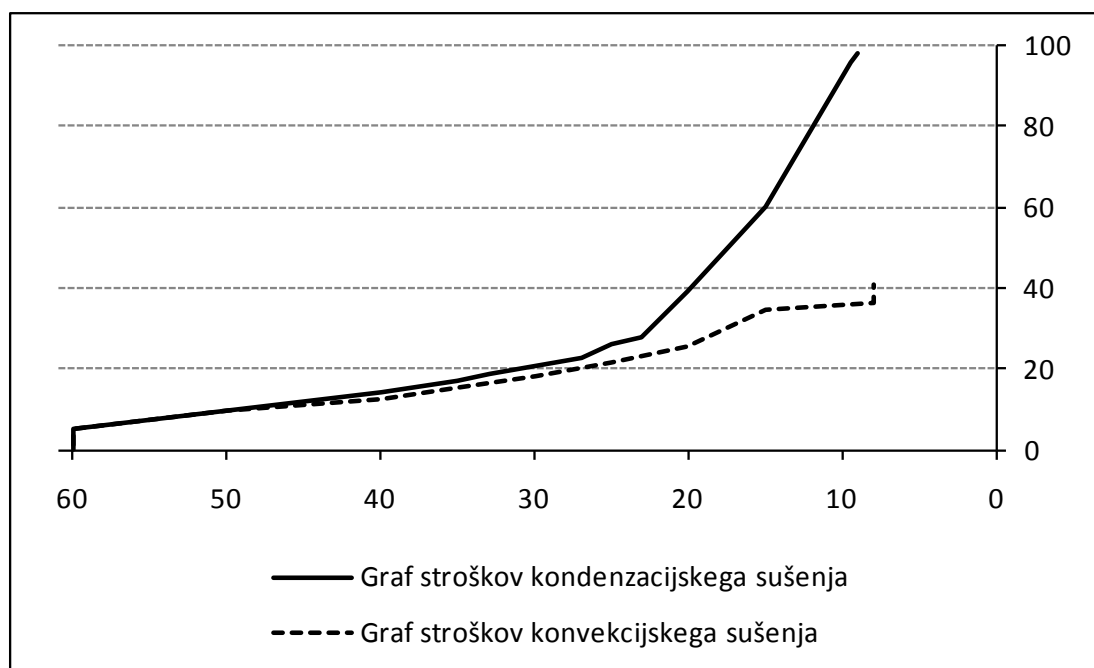
Kljub opazno višji energijski potratnosti konvencionalnega sušenja nad TNCS, nam izračuni celotnih stroškov sušenja ne pokažejo razlike. Konvencionalno sušenje je celo za odtenek ugodnejše (Slika 22). Glavni vzrok za to tiči v cenah samih energentov (cena električne energije, ki se porablja pri kondenzacijskem postopku je lahko tudi 100 % višja od trenutne cene toplotne energije, pridobljene iz lesne mase) in v skoraj trikrat višjih investicijskih stroških kondenzacijskega sušenja. V območju lesne vlažnosti pod TNCS se začne poraba energije pri kondenzacijskem sušenju zviševati. Razlika v celotnih stroških sušenja pa se začne povečevati v prid konvencionalnemu postopku sušenja. Pod lesno vlažnostjo 15 % se potrdijo navedbe Goriška (1994), da kondenzacijsko sušenje trdih listavcev, pod to vlažnostjo ni več smotrno.



Slika 21 Specifični strošek na % lesne vlažnosti v odvisnosti od vlage

Enaka zgodba se ponovi, če za primerjavo obeh načinov sušenja vzamemo specifični strošek na % lesne vlažnosti (Slika 21). To odvisnost smo v tej nalogi uporabili tudi za določitev točke optimalnega prehoda med obema načinoma sušenja. Ta točka se nahaja pri vlažnosti 35,1 % kar tudi ustreza območju nasičenja celičnih sten pri bukovini.

Pri lesni vlažnosti nad to točko je strošek osušitve lesa za 1 % lesne vlažnosti pri kondenzacijskem sušenju ugodnejši kot pri konvencionalnem načinu sušenja. Pri vlažnosti lesa pod to točko, pa so specifični stroški na % lesne vlažnosti pri kondenzacijskem sušenju višji, kot pri konvencionalnem.

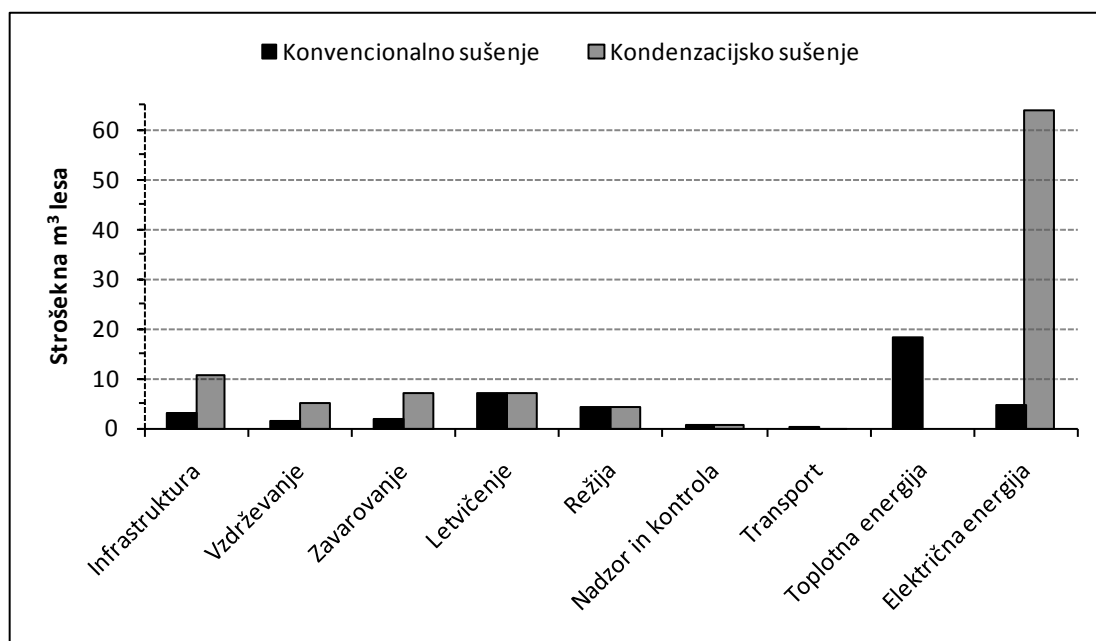


Slika 22 Prikaz rasti stroškov kondenzacijskega in konvekcijskega sušenja v odvisnosti od lesne vlažnosti

Eden od vzrokov za tako nizke stroške sušenja pri konvencionalnem načinu je tudi uporaba pristnega Ameriškega režima za simulacijo sušenja. Ta ameriški režim je zelo ostro zastavljen in omogoča sušenje bukovine z izredno nizkimi časi sušenja in minimalno porabo energije. Sama kvaliteta posušenega lesa po takem režimu je zelo vprašljiva. Vpliva kvalitete posušenega lesa, pa zaradi načina dela nismo mogli upoštevati.

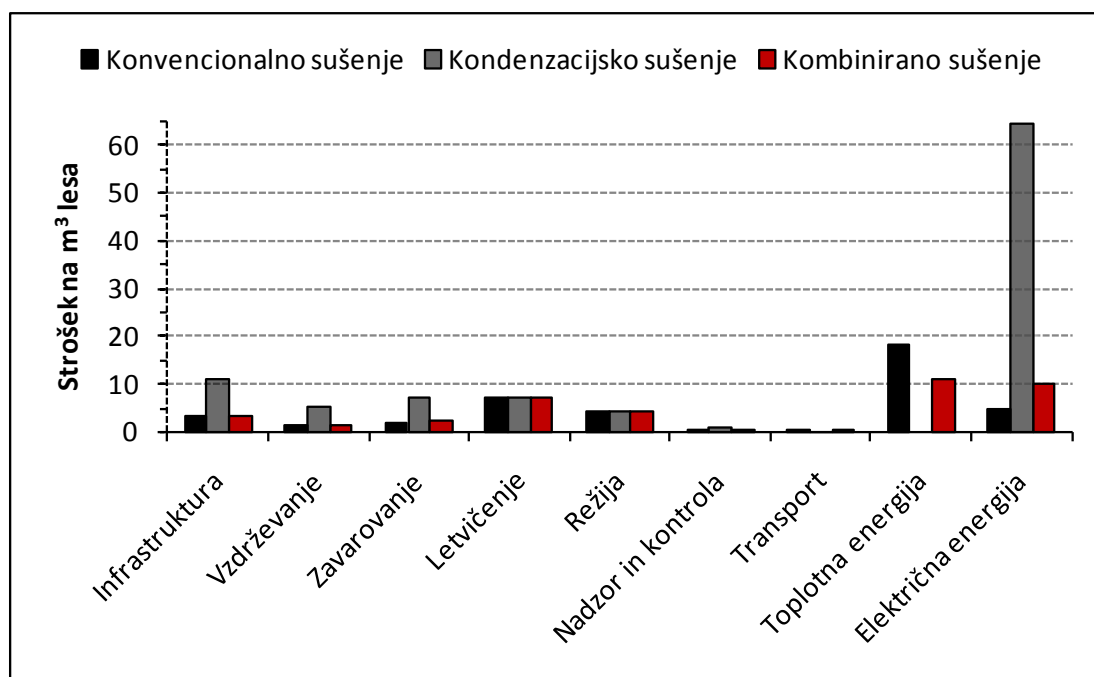
Zaradi velike razlike v času sušenja med obema postopkoma pride tudi do velike razlike v potrebnih kapacitetah sušilnega postroja. Za lažje in preglednejše izračune smo se odločili za enako kapaciteto posamičnih sušilnih komor, tako pri kondenzacijskem, kot tudi pri konvencionalnem sušenju. Pri kondenzacijskem sušenju je za zadostitev letnim kapacitetam 20 000 m³ žaganega lesa, potrebno kar 21 sušilnih komor s kapaciteto 125 m³. Pri konvencionalnem sušenju zaradi krajšega časa sušenja potrebujemo le 9 komor, enake kapacitete.

Vrednost kondenzacijske sušilnice lahko presega vrednost konvencionalne tudi za 80 %. Ta dva podatka nam pokažeta, da je začetni vložek v kondenzacijsko sušenje pri takšnih kapacitetah, ekstremno višji od vložka, ki je potreben za konvencionalni način sušenja. Višji investicijski stroški kondenzacijskega sušenja, glede na konvencionalno sušenje, za sabo potegnejo tudi višje stroške vzdrževanja in zavarovanja infrastrukture (Slika 13). Razlika v potrebnih kapacitetah sušilnega postroja se kažejo tudi v fiksnih stroških sušenja po obeh postopkih. Ti so v primeru kondenzacijskega sušenja mnogo višji od fiksnih stroškov pri konvekcijskem sušenju. Pri obeh načinih sušenja glavni strošek predstavlja energija. Pri konvencionalnem toplotna, pri kondenzacijskem sušenju pa daleč največji strošek (65 %) predstavlja električna energija (Slika 23).



Slika 23 Shema strukture stroškov pri konvencionalnem in kondenzacijskem sušenju

Pri izračunih optimalne kombinacije kondenzacijskega in konvencionalnega postopka sušenja, v tej nalogi nismo dosegli bistvenih prihrankov v primerjavi z sušenjem samo po konvencionalnem postopku. S kombiniranim postopkom, bi pri sušenju kubičnega metra lesa prihranili le 0,12 €. Leten prihranek pri kapaciteti 20 000 m³, pa bi znašal 2400 €. V tej nalogi ni bil upoštevan vpliv kvalitete posušenega lesa na stroške sušenja. Glede na izredno oster režim, ki je bil uporabljen pri simulaciji konvencionalnega sušenja, bi lahko sklepali, da s kombinacijo obeh načinov sušenja pridobimo na kvaliteti in hkrati s tem povečamo prihranke. Z kondenzacijskim sušenjem pri vlažnosti lesa nad TNCS se lahko izognemo napakam, kot so: kolaps, pokline, obarvanja, letvična progavost in delno tudi zaskorjenje. Glaven krivec za tako majhne prihranke pri kombiniranem sušenju se skriva v trenutno zelo nizkih cenah toplotne energije, pridobljene iz lesnih ostankov. Če primerjamo strukturo stroškov (Slika 24) vseh treh načinov sušenja (konvencionalno sušenje, kondenzacijsko sušenje, kombinirano kondenzacijsko z konvencionalnim sušenjem), opazimo, da se stroški infrastrukture in z njimi povezani stroški zavarovanja in vzdrževanja med kombiniranim in konvencionalnim sušenjem bistveno ne razlikujejo medtem ko pri kondenzacijskem sušenju močno odstopajo navzgor. Poraba toplotne energije se pri kombiniranem sušenju glede na konvencionalno zniža za 40 %, poraba električne energije pa se v primerjavi s konvekcijskim poveča za skoraj 3 krat. Pri kombiniranem postopku sta stroška obeh energij približno izenačena. Celotni strošek energije pri kombiniranem postopku obsega najmanjši delež celotnih stroškov sušenja (52 %) napram kondenzacijskemu (65 %) in konvencionalnemu (55 %) sušenju.



Slika 24 Shema strukture stroškov pri konvencionalnem, kondenzacijskem in kombiniranem sušenju

Če podjetje ne bi imelo možnosti nakupa toplotne energije po tako ugodnih cenah, oziroma če bi se cene toplotne energije v prihodnosti dvignile, bi kombiniranje sušilnih postopkov pripeljalo do večjih prihrankov. Ob enotni ceni toplotne in električne energije (0,10 €/kWh), bi pri kombinaciji kondenzacijskega in konvencionalnega sušenja dosegli v primerjavi s konvencionalnim sušenjem prihranke v višini 10,56 € na kubični meter lesa. Torej bi se stroški sušenja znižali za 18,3 %. Letni prihranek, pa bi znašal 211 000 €.

6 SKLEPI

V konkretnem primeru, kombinacije kondenzacijskega in konvencionalnega sušenja, analiziranem v tej nalogi, smo točko optimalnega prehoda iz enega v drug postopek sušenja izračunali pri lesni vlažnosti 35,1 %. S kombinacijo sušenja smo dosegli zmanjšanje porabe energije v primerjavi s samostojnima postopkoma. V primerjavi s konvencionalnim postopkom se je zmanjšala predvsem poraba toplotne energije in delno povečala poraba električne energije.

Kljub manjši skupni porabi energije pri kombiniranem postopku, bistvenih znižanj stroškov nismo dosegli. Le ta znaša zgolj 0,12 € na m³ posušenega lesa. K temu v največji meri botrujejo zelo nizke cene toplotne energije pridobljene iz lesne mase v primerjavi z cenami električne energije.

Predvidevamo, da bi se s povečevanjem začetne lesne vlažnosti, začele bolje kazati prednosti kondenzacijskega načina sušenja pri višjih lesnih vlažnostih. S tem bi se povečali tudi prihranki pri kombiniranem sušenju.

7 POVZETEK

Čas in energija, potrebna za sušenje lesa in s tem povezani stroški so med najvišjimi v proizvodnji lesnih izdelkov. Analiza stroškov sušenja je zelo zapletena, saj je potrebno oceniti stroške investicij, vzdrževanja, dela in energetike. K analizi, pa je potrebno priključiti tudi stroške napak lesa in dodano vrednost.

Stroške konvencionalnega sušenja smo izračunali s CAE računalniškim modelom, stroške kondenzacijskega sušenja pa smo ocenili z analizo konkretno izvedenega postopka. Izračun smo naredili na primeru sušenja bukovega lesa (*Fagus Sylvatica* L.), debeline 50 mm. Z oceno in primerjavo stroškov smo predvideli lesno vlažnost, pri kateri je prehod med obema postopkoma sušenja optimalen.

Z oceno in primerjavo stroškov smo predvideli lesno vlažnost, pri kateri je prehod med obema postopkoma sušenja optimalen. Ugotovili smo prednosti začetnega sušenja svežega lesa po kondenzacijskem načinu in nato dosušitev do končne vlažnosti po konvencionalnem postopku.

Optimalni prehod med obema načinoma sušenja smo dosegli pri lesni vlažnosti 35,1 %. Večjih prihrankov s kombiniranjem sušenja nismo potrdili, vzrok pa je velika razlika med cenama električne in toplotne energije.

Izračunani prihranki znašajo pri letni kapaciteti obrata 20 000 m³ le 2400 €. Ob predpostavki istih cen električne in toplotne energije, bi se prihranki zelo povečali in bi na letni ravni lahko dosegli vrednost 211 000 €.

8 VIRI

- Anon. 1980. Was man vor der Kauf einer Trocknungsanlage wiesen muss. BM, 5: 124-128
- Arganbright G. D. 1979. Developments in applied drying technology. 1971 – 1977. Forest Products Journal, 29, 12: 14-20
- Brunner R. 1987. Die Schnittholztrocknung. Hannover, R. Brunner GmbH: 322 str.
- Chen Y. S., Helmer A. 1982. Principles of dehumidification lumber drying. Forest Product Journal, 32, 5: 24-28
- Egger G., Tronstad S. 1980. Dehumidification drying. Conventional drying comparative on energy consumption, The Norwegian Institute of Wood Working and Wood Technology. Simp. Medison
- 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., Straže A., Lapajne I. 2008. Primerjava hitrosti in kakovosti različnih tehnik sušenja bukovine (*Fagus Sylvatica* L.). Les, 60, 7/8: 268-274
- Gorišek Ž., Firšt U., Straže A. 2009. CAE analysis and optimization of energy consumption and costs of wood drying with use of different drying techniques. V: Cost Action E53 Conference 22. – 23. Oktober 2009, Lizbona
- Hess H. 1980. Holztrocknung. Herausgeber Rheinisch-Westfälische Elektrizitätswerk (RWE) AG. Essen
- Kininmonth J. A. et. al. 1980. Energy consumption in wood drying. V: IUFRO Div. V. Conference Oxford. Oxford, April 1980, New Zealand, FRI Rotorua
- Landenberger W. D. 1976. Holztrocknung. Holz zentralblatt, 102, 49: 10-11
- Lippold A. 1987. Das Energiesparpotential bei der technischen Schnittholztrocknung in der DDR. Holztechnologie, 28, 1: 17-20
- Mrak C. 1988. Ekonomika sušenja. V: Sodobne metode vodenja sušenja lesa. Strokovni seminar, Ljubljana, 3. – 4. Marec 1988. Ljubljana, Razvojni inštitut Slovenijales: 51-71
- Rebernik M. 1999. Ekonomika podjetja. Ljubljana, Gospodarski vestnik: 445 str.
- Simpson W. T. 1991. Dry Kiln. Operator's manual. Madison, Wisconsin, United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: 274 str.
- Straže A., Gorišek Ž. 2007. CAE analiza in optimizacija porabe energije pri sušenju žaganega lesa z uvedbo predsušenja na prostem. Les, 59, 5: 142-148

- Teischinger A. 1981. Die technische Holz Trocknung heute. Internationaler Holzmarkt, 72, 3: 5-6
- Trübswetter T. 2006. Holz Trocknung. Verfahren zur Trocknung von Schnittholz – Planung vor Trockenanlagen. Leipzig, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag: 204 str.
- Ullevalseter R. O. 1971. Lumber drying by condensation with the use of refrigerated dew point. Rept. Agri. Univ. Norway. Institut for Wood Technology, Vollebakk: 64 str.
- Vanicek F. H. 1980. Energiefragen der Trockentechnik. Internationaler Holzmarkt, 71, 2: 6-7

ZAHVALA

Rad bi se zahvalil svojemu mentorju prof. dr. Željku Gorišek in recenzentu doc. dr. Jožetu Kropivšek za strokovno svetovanje, potrpežljivost in spodbudo pri nastajanju diplomskega projekta.

Hvala tudi tebi Tadeja, ki me sprejemaš takšnega kot sem. V vseh mojih vzponih in padcih si verjela vame, me optimistično spodbujala ter mi nesebično pomagala.

Iskrena hvala tudi staršem za vso spodbudo, podporo in finančno pomoč pri študiju.

Hvala tudi vsem ostalim, ki ste mi v času študija stali ob strani.

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Primož TOMEČ

**OPTIMALNO KOMBINIRANJE KONDENZACIJSKEGA IN
KONVEKCIJSKEGA SUŠILNEGA POSTOPKA**

DIPLOMSKI PROJEKT

Univerzitetni študij 1. - stopnja

Ljubljana, 2010