

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Denis PLAVČAK

**NAČELA ODLOČANJA O TEHNIČNEM SUŠENJU
V MANJŠIH PODJETJIH**

DIPLOMSKI PROJEKT
Univerzitetni študij – 1. stopnja

**PRINCIPLES OF TECHNICAL DRYING
IN SMALL COMPANIES**

B. Sc. THESIS
Academic Study Programmes

Ljubljana, 2013

Diplomski projekt je zaključek univerzitetnega študija prve stopnje lesarstva. Delo je bilo opravljeno na Katedri za tehnologijo lesa na Oddelku za lesarstvo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani.

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.

Denis PLAVČAK

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Du1
DK	UDK 630*847.2
KG	les/sušenje/tehnično sušenje/kriteriji odločanja
AV	PLAVČAK, Denis
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	2013
IN	NAČELA ODLOČANJA O TEHNIČNEM SUŠENJU V MANJŠIH PODJETJIH
TD	Diplomski projekt (Univerzitetni študij – 1. stopnje)
OP	VIII, 32 str., 8 pregl., 17 sl.
IJ	sl
Jl	sl/en
AI	Predstavili smo odločitveni diagram za izbiro sušilne tehnike, ki uporabnika vodi po relevantnih kriterijih in merilih do optimalne izbire sušilnega postopka. Izbira temelji na vrednotenju in ocenjevanju 7. kriterijev: lesne vrste, vlažnosti lesa, dimenzij sušечеge se lesa, kapacitet, oskrbe z energijo, kakovosti sušenja in potrebe po fleksibilnosti. Končna kriterijska ocena predstavlja uporabniku vodilo za najprimernejšo izbiro tehnologije in tehnike sušenja v konkretnem lesnopredelovalnem obratu.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Du1
DC UDC 630*847.2
CX wood/drying/drying techniques/criterial desichens
AU PLAVČAK, Denis
AA GORIŠEK, Željko (supervisor)/STRAŽE, Aleš (co-supervisor)
PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Departmen of Wood Science
and Technology
PY 2013
TI PRINCIPLES OF TECHNICAL DRYING IN SMALL COMPANIES
DT B. Sc. Thesis (Academic Study Programmes)
NO VIII, 32 p., 8 tab., 17 fig.
LA sl
AL sl/en
AB This paper presents a decision-making flow chart for the selection of drying techniques to guide the user according to the relevant criteria and to choose the optimal drying process. The selection is based on the evaluation and assessment of 7 criteria: wood species, wood moisture content, drying timber dimensions, capacity, energy, quality of drying and the need for flexibility. The final criteria score represents the user guide for the selection of the most appropriate technologies and techniques in the real drying wood processing plant.

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 IZHODIŠČE.....	1
1.2 HIPOTEZE.....	1
1.3 CILJI PROJEKTA	2
2 SPLOŠNI DEL	3
2.1 DEJAVNIKI ODLOČANJA PRI IZBIRI TEHNOLOGIJE SUŠENJA LESA	3
2.2 TEHNOLOGIJA SUŠENJA	5
2.2.1 Sušenje na prostem (naravno sušenje)	6
2.2.2 Tehnike sušenja	8
2.2.2.1 Komorsko – konvencionalno sušenje.....	8
2.2.2.2 Kondenzacijsko sušenje	9
2.2.2.3 Vakuumsko sušenje.....	11
2.2.2.4 Visokofrekvenčno sušenje	13
2.2.2.5 Solarno sušenje – sušenje s pomočjo sončne energije	14
2.3 ČAS IN HITROST SUŠENJA.....	17
2.3.1 Mehanizem sušenja	17
2.4 PORABA ENERGIJE	18
3 METODE	20
3.1 ANALIZIRANJE PODATKOV ZA DOLOČITEV TEHNIČNEGA SUŠENJA	20
4 REZULTATI	21
4.1 PRIDOBIVANJE OSNOVNIH PODATKOV K ODLOČITVI NAČINA SUŠENJA	21
4.1.1 Karakterizacija lesa	22
4.1.2 Določitev velikosti in števila komor ter letna količina sušечеlega lesa	23
4.1.3 Oskrba z energijo in potrebni prostor	24
4.2 ODLOČITVENI DIAGRAM.....	25
4.3 STROŠKI PRI NAJPOGOSTEJE UPORABLJENI KONVENCIONALNI TEHNIKI SUŠENJA.....	28

5	RAZPRAVA	30
6	SKLEPI	31
7	VIRI.....	32
	ZAHVALA	

KAZALO PREGLEDNIC

	str.
Preglednica 1: Koeficienti za zračno suh les posameznih drevesnih vrst (Gorišek in sod., 1994).....	8
Preglednica 2: Prednosti in slabosti konvencionalnega sušenja.....	9
Preglednica 3: Difuzijski koeficient vezane vode, odvisen od tlaka pri vakuumskem sušenju (Gorišek in sod., 1994).....	11
Preglednica 4: Struktura porabe energije pri različnih postopkih sušenja.....	19
Preglednica 5: Ustreznost sušilne tehnike ob danih kriterijih.....	24
Preglednica 6: Odločitvena tabela sušilne tehnike (za izpolnjevanje).....	26
Preglednica 7: Določitev sušilne tehnike za naše podjetje.....	28
Preglednica 8: Zbrani stroški konvencionalnega sušenja	29

KAZALO SLIK

	str.
Slika 1: Dejavniki, ki vplivajo na izbiro sušilnega procesa	4
Slika 2: Izbira tehnologije sušenja z vidika umestitve sušilnega postopka in lesa.	4
Slika 3: Letno gibanje relativne vlage vlažnosti in temperature zraka za področje Bleda (–) in Nove Gorice (–) (Gorišek in sod., 1994).....	7
Slika 4: Kondenzacijski agregat (Gorišek in sod., 1994).....	10
Slika 5: Potek posameznih faz kondenzacijskega sušenja (Pervan, 2000).	10
Slika 6: Shema delovanja in prihranek energije pri povratnem izkoriščanju toplote (Gorišek, 1993).	12
Slika 7: Primerjava vlažnostnih profilov med konvekcijskim sušenjem s toplim zrakom in visokofrekvenčnim sušenjem (Radio frequency..., 2013).....	14
Slika 8: Letna porazdelitev obsevanja na različnih lokacijah: Kartum (Sudan) in Ljubljana..	15
Slika 9: Aktivni sončni sistem za sušenje lesa (Gorišek, Novak, 1998).	16
Slika 10: Kombinirana sušilnica s sončnim kolektorjem in klasičnimi grelniki (Gorišek in sod., 1994).....	16
Slika 11: Krivulja sušenja in sušilni diagram (Gorišek, 2012).	17
Slika 12: Dejavniki, ki določajo hitrost sušenja lesa nad TNCS pri konvekcijskem sušilnem procesu.	18
Slika 13: Dejavniki, ki pri konvekcijskem sušilnem procesu določajo hitrost sušenja lesa pod TNCS.	18
Slika 14: Razpored energentov od potratnega do varčnega (Izbira energenta..., 2013)	24
Slika 15: Odločitveni diagram za izbiro sušilne tehnike.....	26
Slika 16: Konvencionalna sušilnica podjetja	27
Slika 17: Stolpčni prikaz deležev stroškov konvencionalnega sušenja	29

1 UVOD

1.1 IZHODIŠČE

V lesnopredelovalni industriji ima sušilni proces zelo pomembno vlogo, saj je žagan les ali elemente potrebno pred nadaljnjo predelavo osušiti na primerno vlažnost. Zaradi dolgotrajnega procesa, velike porabe energije in velikega tveganja nastanka napak pa je izbira optimalne tehnologije sušenja zelo zahtevna.

Pri pravilni izbiri tehnologije in načina sušenja je potrebno dobro poznati dejavnike, ki vplivajo na odločitev sušenja pri investitorju. Namreč cilj vsakega investitorja je, da poteka sušenje lesa v njegovi obratovalnici čim bolj fleksibilno in ekonomično. Za doseganje tega pa je potrebno dobro poznati izhodišča in zahteve, ki so opredeljene glede na lesno vrsto, debelino, lesno vlažnost in željeno kakovost osušenega lesa. Izbira optimalne vrste sušilnega postopka in velikosti naprave mora temeljiti na natančni proučitvi tehnično tehnoloških parametrov, ki bodo na koncu omogočali doseganje najboljših rezultatov z vidika kakovosti, porabe energije in seveda cene.

Ker na izbiro tehnologije sušenja vpliva veliko dejavnikov, ni mogoče predhodno postaviti splošnega odločitvenega modela z enoznačno odločitvijo, saj so razmere in zahteve od primera do primera zelo različne. Tudi merila niso enako pomembna, ampak ima vsako posamezno določeno težo, kar pomeni, da moramo zbrati čim večjo število izhodiščnih informacij. Zato je k izbiri optimalnega sušilnega postopka potrebno pristopati individualno s predpostavko, da je končna odločitev ekonomsko najbolj sprejemljiva.

1.2 HIPOTEZE

Za male obratovalnice je investicija v sušilno napravo lahko precej rizična v kolikor sušilni postopek ni bil ustrezno izbran. Pri pravilni, optimalni odločitvi o nakupu novih sušilnih kapacitet je potrebno upoštevati veliko dejavnikov, na katere pa mnogokrat investitorji niso pozorni. Predpostavljamo, da se investitorji preveč zanašajo in zaupajo komercialnim ponudnikom, katerim je edini cilj vsiliti svojo blagovno znamko sušilne naprave. Pri tem pa ne upoštevajo zahteve in potrebe končnega uporabnika. Komercialni ponudniki v večini primerov svoje ponudbe podajo želenim kupcem kar preko spleta, kjer so opisani materiali, oprema in tehnične karakteristike, ki pa končnemu investitorju težko prikažejo ali je ta ponujena možnost res optimalna za njegove potrebe, ki jih mora doseči.

Pogosto se dogaja, da se bodoči uporabniki sušilnih naprav včasih ne vede odločijo za sušilno tehniko s strani komercialnih trgovcev. Ti jih prepričajo s svojo ponudbo, ob tem pa ne posvetijo pozornosti na zahteve oziroma dejstva glede sušenja lesa pri potencialnih kupcih.

Predpostavljamo, da s podrobnejšo analizo stanja in potreb vsakega podjetja posamezno omogočimo optimalnejšo izbiro tehnologije sušenja, ki bo gotovo prispevala k ekonomski učinkovitosti podjetja.

1.3 CILJI PROJEKTA

Pri manjših lesnopredelovalnih centrih oziroma podjetjih je največkrat premalo usposobljenih strokovnih kadrov, ki bi se lahko optimalno odločili za izbiro ustrezne sušilne naprave in njene tehnologije ter načina sušenja za njihove potrebe.

Natančneje bomo pojasnili dejavnike (lesna vrsta, debelina, začetna in končna vlažnost lesa, določitev velikosti sušilnih kapacitet ter oskrbe z energijo pri posameznih tehnikah sušenja), ki jih moramo upoštevati pri odločanju o tehnologiji in tehniki sušenja.

Postavili bomo odločitveni blok diagram, ki bo s kriteriji in merili uporabnika vodil do pravilne optimalne izbire sušilnega postopka za svojo obratovalnico.

2. SPLOŠNI DEL

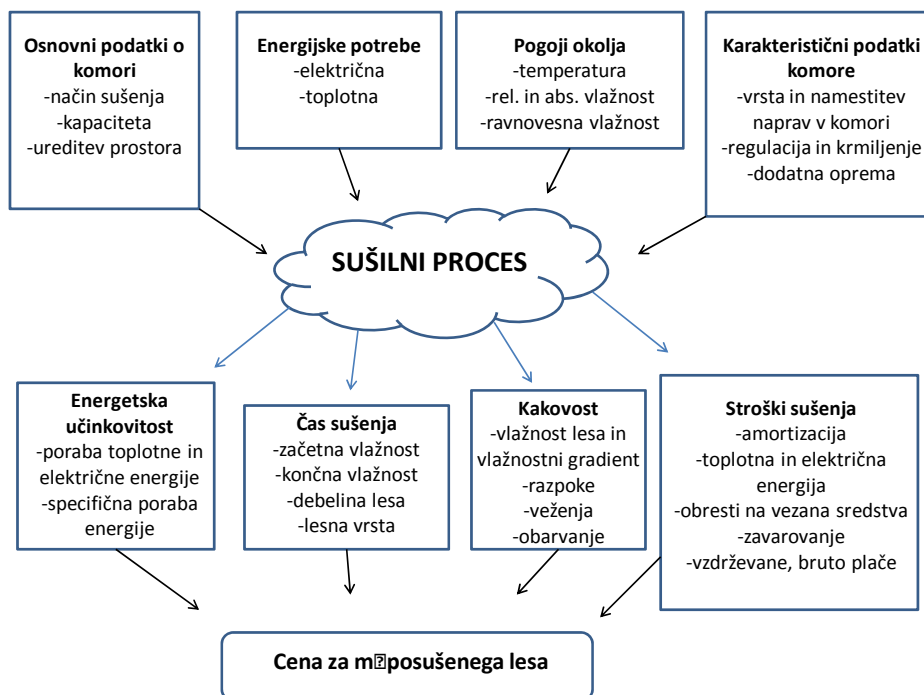
2.1 DEJAVNIKI ODLOČANJA PRI IZBIRI TEHNOLOGIJE SUŠENJA LESA

Tehnološki postopki sušenja lesa so precej kompleksni in zahtevajo natančno poznavanje možnih vzrokov za morebitne napake, ki bi se med sušenjem lahko pojavile. Vzroki napak so zelo raznoliki in se razlikujejo glede na lesno vrsto in kakovost lesa, ki ga sušimo glede na izbrano tehniko sušenja in samo izvedbo sušilnega postopka ter tudi glede specifičnih dejavnikov vsakega posameznega primera. Torej, proces sušenja mora biti prilagojen in voden vsakemu posameznemu primeru ustrezno.

V praksi že poznamo različne sušilne tehnike z bolj ali manj primernimi programi oziroma režimi sušenja, kjer operater v računalnik vnese potrebne podatke o sušečem se lesu. Program je načeloma že nastavljen tako, da poteka sušenje nemoteno preko tipal v komori, ki omogočajo krmiljenje in regulacijo celotnega procesa. Programi se dandanes večinoma vodijo mikroprocesorsko in nadzorujejo temperaturo, hitrost zraka, zapiranje/odpiranje loput, navlaževanje; vgrajene pa so tudi dodatne funkcije, ki zagotavljajo relativno varno in zanesljivo vodenje sušenja glede na izbrane procesne parametre. Kontrola in nadzor pa sta pri katerikoli tehniki še kako pomembna, saj vemo, da v lesnopredelovalni industriji predstavlja sušenje časovno dolgotrajen proces in je hkrati tudi energetsko precej potratno. Bistvo sušenja lesa je, da dosežemo kakovostno osušen les z želeno končno vlažnostjo, ki jo narekuje nadaljnji postopek predelave oziroma vgradnja osušenega lesa.

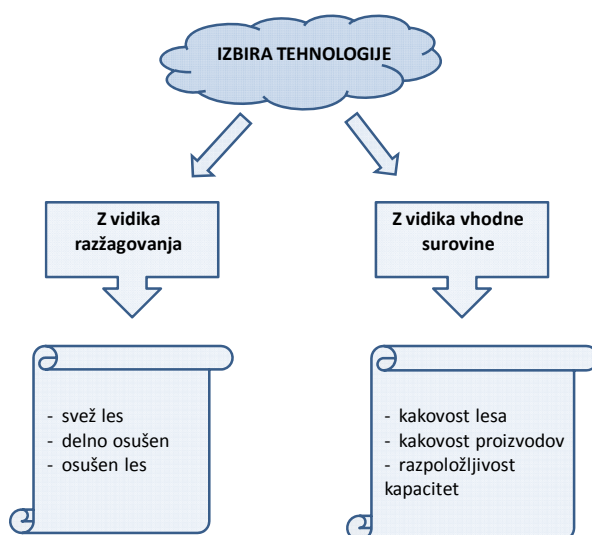
Tako pri procesu sušenja v glavnem strmimo k temu, da je ravnovesje med časom, kakovostjo in seveda dokončno ceno čim bolj optimalno in razumno. Ti trije dejavniki so ključni pri odločitvah o izbiri sušilnega postopka (Perré, 2007). Kakovost sušenja je končni rezultat, kot posledica vpliva ostrine sušenja, kakovosti vhodne surovine in tehnike sušenja. Celotna posušena šarža mora imeti enakomerno vlažnost v vseh sortimentih in po celem prerezu žaganega lesa ali elementov. Les mora še vedno ostati mehansko čvrst (trden in stabilen) in po procesu ne želimo dodatnih napak, kot so razpoke, veženja, sprememba barve ali zaskorjenost. Med procesom sušenja ima pomembno vlogo tudi poraba energije. Različne tehnike sušenja predstavljajo različna razmerja med porabljeno toploto in električno energijo, ki značilno vpliva tudi na ceno sušenja. Načelno lahko pritrdimo podatkom, da hitrejši načini tehničnega sušenja zahtevajo tudi večjo porabo energije. Z vidika stroškov sušenja je pomembno tudi poznavanja razmerja med porabljeno električno in toplotno energijo, strošek slednje pa je odvisen od uporabljenega energenta. V lesnopredelovalni industriji se pogosto kot najprimernejši vir uporabljajo lesni ostanki, ki ugodno vplivajo tudi na celotne stroške sušenja.

S shematskim prikazom (Slika 1) predstavljamo postopek, ki v prvem koraku predstavi smernice, značilne za sušilni proces in nato kaj od njega pričakujemo vse do končne cene posušenega lesa.



Slika 1: Dejavniki, ki vplivajo na izbiro sušilnega procesa.

Uporaba lesa v praksi povsod predvideva, da je les že pred uporabo osušen na primerno lesno vlažnost, ki jo bo imel kasneje na mestu vgradnje. Torej je sušenje lesa nujna tehnološka operacija pri čemer izbira tehnologije temelji glede na umestitev sušilnega postopka in z vidika vlažnosti in kakovosti lesa (Slika 2).



Slika 2: Izbira tehnologije sušenja z vidika umestitve sušilnega postopka in lesa.

V procesu primarne predelave lesa lahko sušilni proces umestimo takoj po razžagovanju in sušimo še svež žagan les, razžagovanje v zahtevane elemente pa izvedemo, ko je les že osušen na zeleno končno vlažnost. Iz tako posušenega lesa lahko pridobimo kakovostne in zahtevne elemente, izkoristki pa so relativno ugodni. Posebno pri razpolaganju s slabšo kakovostjo žaganega lesa se odločamo za decimiranje oziroma razžagovanje žaganega lesa še v svežem stanju in sušimo že izdelane elemente. V tem primeru že v začetni fazi priprave lesa na sušenje izžagamo kakovostne decimirane elemente in izločimo čim več napak (grč, zavitih vlaken, smolik ipd.), ki bi lahko med procesom sušenja negativno vplivale izkoristek. Elemente razžagujemo z ustrezno nadmero, jih letvičimo v zložaj in jih čelno zaščitimo z raznimi premazi ali sponkami pred pokanjem.

Če pa razpolagamo tudi z ustreznim prostorom za izvajanje sušenja na prostem, pogosto žagan les delno osušimo, ga nato razžagamo elemente in le-te le dosušimo na zeleno končno vlažnost.

Pri izbiri tehnologije sušenja je odločujočega pomena tudi kakovost lesa. Sušilni proces lahko izvedemo kakovostno le, če natančno poznamo karakteristike sušečega se lesa. Zato ob vstopu materiala v proces opravimo celovit pregled, na osnovi katerega določimo intenzivnost sušenja oziroma pripadajoči režim sušenja. V praksi, kjer je vhodna surovina v povprečju manj kakovostna, se odločijo za sušenje pri višji ostrini, kar skrajša čas sušenja, s tem pa tudi nižje stroške. Pri sušenju težje-sušečih lesnih vrst, se pogosto krojenje vrši pred sušenjem, zato sušimo z nižjo ostrino, pri blagih pogojih, tako je čas daljši s tem pa tudi narastejo stroški sušenja.

2.2 TEHNOLOGIJA SUŠENJA

V svetu je bilo do danes razvitih že veliko število tehničnih postopkov sušenja lesa, ki jih proizvajalci tudi nenehno izboljšujejo, tako pri principih delovanja, izvedbah, uporabi novih materialov, kot tudi na opremi, načinih krmiljenja in regulacijah. Med bistvenimi sušilnimi tehnikami ima daleč največji delež komorsko-konvekcijsko sušenje lesa, z mnogo vrstami izvedb, velikosti in opremljenosti.

Sodobne kakovostne sušilne komore so in morajo biti izdelane iz nekorozijskih materialov z dobro toplotno izolacijo, brez toplotnih mostov ter kakršnekoli možnosti zastajanja kondenzacijske vode znotraj komore. Sušilne komore morajo biti paro-tesne in morajo omogočiti odvajanje kondenzirane vode iz sušilnega prostora. Grelci, ventilatorji in ostala oprema v komori mora biti odporna na delovanje v neugodnih razmerah (relativno visoke temperature in vlažnost zraka ter agresivnost mravljinčne in ocetne kisline) hkrati pa mora zagotavljati ustrezno delovanje in enakomerne pogoje po celotni komori.

Tehnično sušenje je v osnovi precej hitreje od naravnega sušenja, zato se temu primerno kažejo znaki napak na sušečem se lesu. Sušilne procese je še nedavno vodil izkušen

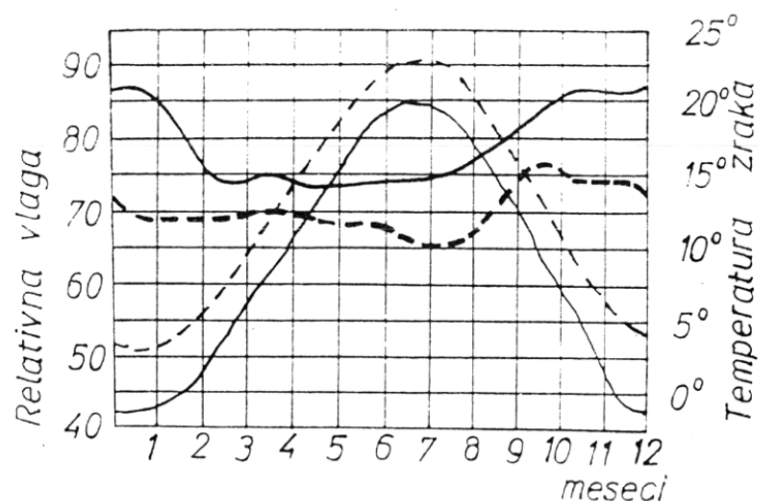
strokovnjak (sušilničar), ki je še pravočasno predvidel možnost nastanka napake in tako iskal najugodnejšo povezavo med sprejemljivo kakovostjo, časom sušenja in stroški, ki so skozi ta čas nastali. V sedanjem času te strokovnjake zamenjujejo računalniško vodenje, ki omogoča več ali manj v celoti avtomatiziran proces (regulacija temperature, hitrosti in usmerjevanje gibanja zraka, odpiranje/zapiranje zračnih loput, navlaževanje,...). Vendar še danes o popolni avtomatizaciji tehničnega sušenja ne moremo govoriti in mikroprocesorsko vodenje predstavlja le veliko pomoč sušilničarju. Zaradi velike raznolikosti in variabilnosti lesa tudi znotraj ene lesne vrste, ni mogoče predstaviti splošnega modela za sušenje. Na kakovost osušenega lesa in optimizacijo sušilnega postopka tako še vedno močno vpliva subjektivni dejavnik.

Dober in izkušen strokovnjak mora znati predvidet in upoštevati finančno tveganje zaradi slabše kakovosti posušenega lesa. Njegovo strokovno znanje mora temeljiti na temeljitom poznavanju naravoslovnih področij, zaradi nenehnega razvoja sušilnih tehnik, pa je le to potrebno sproti spremljati in temeljito nadgrajevati (Straže, 2005).

2.2.1 Sušenje na prostem (naravno sušenje)

Sušenje na prostem je način, ki je najstarejši in najbolj naraven princip sušenja lesa. Les se začne sušiti takoj, ko se drevo poseka in tako je že v gozdu izpostavljen zunanjim klimatskim pogojem, ki so definirani s temperaturo, relativno zračno vlažnostjo, gibanjem zraka (veter) in tako določajo hitrost, čas in ostrino sušenja. Naravni pogoji so za posamezna geografsko območja specifični in so lahko tudi na manjšem območju, kot je npr. Slovenija, zelo razlikujejo (Slika 3). Kljub temu, da sušenje na prostem uvrščamo med blažje načine, je lahko klima na posameznih področjih ali v določenem času preostra, kar se odraža na povečanemu deležu napak. Da preprečimo pojav napak ob preostri klimi, lahko denimo zmanjšamo pretok zraka skozi skladovnico in ga zaščitimo pred direktno sončno pripeko (Novak, 2008).

Sušenje na prostem ali pod nadstrešnicami poteka pri relativno nizkih temperaturah zato je čas sušenja precej dolg, posebno kadar želimo doseči nizke končne vlažnosti. Poleg temperature na čas sušenja vplivajo še relativna zračna vlažnost, hitrosti in možnosti gibanja zraka, letno-zimske padavine in jakost sončnega obsevanja. Učinkovitost naravnega sušenja v Sloveniji lahko ločimo na širši primorski del in preostali večinoma celinski del (Černe, 2011). Kljub dvema območnima deloma je hitrost sušenja najbolj ugodna v pomladnih in poletnih mesecih.



Slika 3: Letno gibanje relativne vlage vlažnosti in temperature zraka za področje Bleda (—) in Nove Gorice (---) (Gorišek in sod., 1994)

Sušenje na prostem je počasno in vendar je energijsko najmanj potratno, saj smo odvisni zgolj od vremenskih razmer in geografske lokacije. Zato je te pogoje smotno čim boljje izkoristiti s pravilnim formiranjem skladovnice in njeno postavitvijo. Namreč ena izmed prednosti je, da za to sušenje ne potrebujemo dodatne energije in nobenega vlaganja v drage naprave. Razmere naravnega sušenja so mile, zato je ta način manj tvegan. Dolgotrajnejši proces pa omogoča večjo sprostitev rastnih napetosti in enakomernjšo porazdelitev vlažnosti med elementi in po prerezu žaganega lesa. Pomanjkljivost sušenja na prostem je vsekakor njegovo trajanje in doseganje previsokih končnih vlažnosti, ki so vezane na ravnovesna stanja, kot jih določajo klimatski pogoji. Velika hiba tega načina sušenja je tudi nemogoča regulacija in uravnavanje želenih pogojev. Denarna sredstva, ki smo jih porabili ob nakupu lesa, so tako dolgo vezana pri čemer pa se za les zahteva velika površina, ki je nenehno izpostavljena nevarnosti biološkim okužb (Geršak in Velušček, 2010).

Čas sušenja lesa na prostem je tako izredno težko določljiv, saj je odvisen od številnih dejavnikov (klima, začetna vlažnost lesa, letni čas, lokacija, način formiranja zložaja, lesna vrsta in njena debelina,...). Naravno sušenje lesa pa se izvaja tudi v delno zaprtih (pokritih) prostorih, v katerih se lahko vzpostavi hitrejše gibanje zraka po principu dimnika, kar pospeši kroženje zraka skozi zložaje. Drug način pospešenega sušenja dosežemo z dodatno namestitvijo ventilatorjev, ki pospešijo gibanje zraka in s tem odstranjevanje vlage s površine lesa (Novak, 2008).

Za približno določanje časa naravnega sušenja uporabimo Kesnerjevo formulo, ki pa lahko tudi precej odstopa zaradi prej naštetih pogojev in dejavnikov sušenja (Preglednica 1).

$$T = k \cdot d \quad \dots(1)$$

T.....čas sušenja [meseci]

k.....koeficient za zračno suh les, glede na drevesno vrsto

d.....debelina lesa [cm]

Preglednica 1: Koeficienti za zračno suh les posameznih drevesnih vrst (Gorišek in sod., 1994)

Smreka 3,2	Macesen 3,8	Brest 5,0	Bukev 5,3
Topol 3,5	Bor 4,5	Javor 5,0	Hrast 5,3

2.2.2 Tehnike sušenja

2.2.2.1 Komorsko – konvencionalno sušenje

V večini je ta postopek pogovorno poznan tudi kot klasično sušenje lesa, kar pa nikakor ni pravilni izraz za to tehniko sušenja. Gre za komorsko obliko sušenja, pri kateri se dosega delovna temperatura do 100 °C tako, da se klima v sušilni komori (temperatura in relativna vlažnost zraka) uravnava z ogrevanjem. Prisilno kroženje zraka, ki dosega hitrost med 1,5 do 4 m/s, omogočajo ventilatorji. Le ti uporabljen zrak delno izmenjujejo preko zračnikov z okoliškim zrakom. V komorah so nameščene še naprave za navlaževanje (uporaba ob preostrih pogojih sušenja), zasuni in usmerjevalne pločevine za izboljšanje aerodinamike sušilne komore. Sušenje je praktično primerno za vse lesne vrste, različnih debelin, dosežemo pa lahko tudi nizko končno vlažnost lesa. Kapacitete komor so v širokem razponu od 1 do 1000 m³ – torej primerno za vsa večja podjetja, kakor tudi za manjše obrtnike.

Komorsko sušenje omogoča izbiro med zidano ali montažno izvedbo iz različnih nerjavečih elementov, še posebno morajo biti ti materiali odporni proti mravljinčni in očetni kislini. S stališča stroškov je izredno pomembno, da je konstrukcija čim bolj izolirana tako, da je koeficient toplotne prehodnosti čim nižji od 0,3 do 1,2 W/m²K (Novak, 2008).

Pri sušenju lesa v konvekcijski komori ima pomembno vlogo kroženje zraka, ki se delno izmenjuje preko dovodnih in odvodnih zračnikov, ki so nameščeni najpogosteje na strop sušilne komore. Prisilno kroženje zraka omogočajo ventilatorji, ki zrak potiskajo skozi grelna naprave, kjer se najprej segreje na delovno temperaturo, nato pa preko usmerjevalnih loput zakroži skozi zložaje, in tako segreje les. Povišana temperatura lesa pospeši predvsem difuzijsko gibanje vode iz sredice sortimentov na površino.

Konvencionalno sušenje, oziroma normalno temperaturno konvekcijsko komorsko sušenje z delno izmenjavo zraka je od postopkov tehničnega sušenja najstarejši in najbolj razširjen način sušenja lesa (Preglednica 2). Po predvidevanjih danes posušimo na ta način približno 90 % vsega žaganega lesa. Prevladujejo pa tipi sušilnic z stropnimi ventilatorji, ki omogočajo prečno kroženje zraka glede na zložaj v komori (Geršak in Velušček, 2010).

Preglednica 2: Prednosti in slabosti konvencionalnega sušenja.

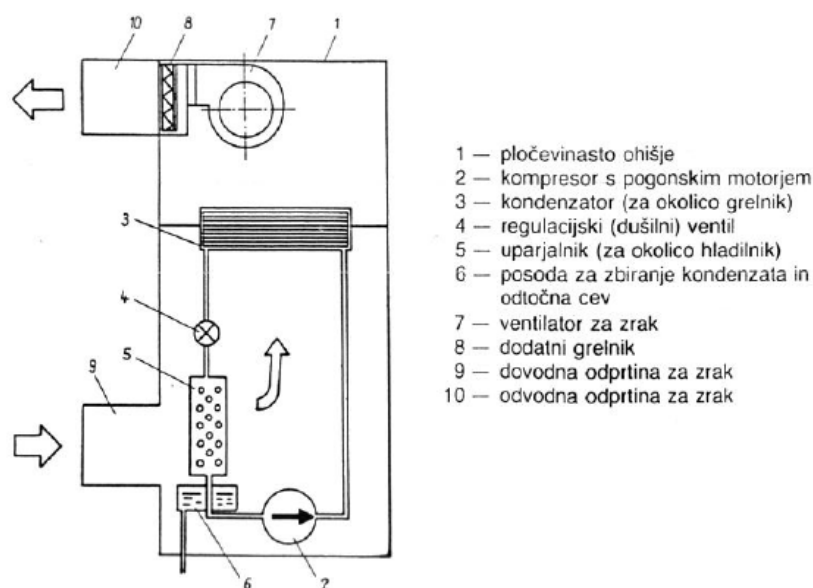
Prednosti	Slabosti
- Sušenje za vse vrste lesa in debeline; - Od visoke začetne vlažnosti do nizke končne vlažnosti; - Najstarejši princip, zato so oprema in programi preizkušeni in natančno izdelani; - Za ogrevanje lahko uporabimo različne grelne medije (para, topla/vroča voda, termo olje, električna energija, ter tudi energija pridobljena iz lesnih ostankov); - Sušenje poteka pri zmerni temperaturi, zato je postopek relativno hiter ob primerni kakovosti osušenega lesa.	- Povečana poraba energije za ogrevanje zraka zaradi delne izmenjave; - Povečano število napak ob ostrejši klimi; - Za ogrevanje je potrebna kotlovnica, če hočemo ekonomično sušenje.

2.2.2.2 Kondenzacijsko sušenje

Že naziv sušenja nam pove, da se voda iz sušilnega procesa izloča po principu kondenzacije. Voda, izločena iz lesa se vodi preko hladne površine agregata, kjer se utekočini in odstrani iz procesa.

Sušenje poteka pri nizkih temperaturah, zato je do končne vlažnosti lesa potreben daljši čas sušenja kot pri konvencionalnem načinu (Pervan, 2000).

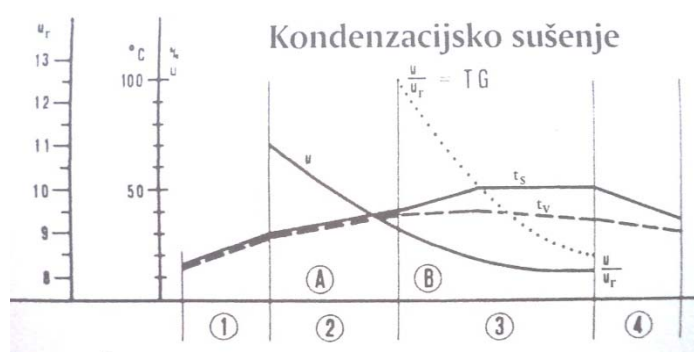
Pri tem načinu sušenja ne prihaja do izmenjave zraka z okolico ampak se na hladnih površinah agregata razvlažen zrak ponovno segreje in vrača v sušilni proces. Poznamo dva načina ohlajanja hladilne površine. En način je s toplotno črpalko in drugi s toplotnim izmenjevalcem, skozi katerega se pretaka mrzla voda. Način ohlajanja s toplotnim izmenjevalcem dandanes izgublja pomen, ker je med procesom vodo potrebno ohladiti, to pa predstavlja dodatno energetske porabo. Zaradi te hibe se tudi v praksi pogosteje uveljavljajo kondenzacijski postopki s toplotno črpalko (Slika 4).



Slika 4: Kondenzacijski agregat (Gorišek in sod., 1994)

Kondenzacijski način sušenja se v večini uporablja za debelejšje žagarske sortimente, iz ekonomskega vidika pa se ne dosegajo nizke končne vlažnosti lesa ampak zgolj med 15 in 18 %. Razlog je v nizkih sušilnih temperaturah (maksimalne so do 45 °C), ki ne pospešujejo učinkovito difuzijskega toka vezane vode. Čeprav tehnika omogoča sušiti tudi na nižjo vsebnost vlage v lesu, pa takšen način zaradi podaljševanja časa ni več ekonomičen (Pervan, 2000).

Proces kondenzacijskega sušenja lesa poteka skozi štiri faze: 1-segrevanje, 2-sušenje nad TNCS, 3-sušenje pod TNCS in 4-ohlajevanje (Slika 5).



Slika 5: Potek posameznih faz kondenzacijskega sušenja (Pervan, 2000).

Pri fazi segrevanja je potrebno zrak segreti na 20 do 25 °C, bodisi s pomočjo električne energije, vrele vode ali pa vodne pare (način je odvisen od vira toplotne energije). Temperatura se zlasti v poletnih mesecih zelo hitro doseže, nekoliko oteženo je v zimskem času.

Po segrevanju sledi sušenje, ki je razdeljeno na dve območji; nad in pod točko nasičenja celičnih sten. Sušenje lesa pod to točko poteka pri temperaturah od 30 do 35 °C, z visoko relativno vlažnostjo zraka od 82 do 94 %. Pri sušenju pod TNCS pa se temperatura sušenja še poveča za okoli 10 °C. Ker imamo v lesu le še vezano vodo, je intenzivnost sušenja precej nižja. (Pervan, 2000). Sušenje je zaradi nižje temperature počasnejše, upočasnjeno je tudi gibanje vode, zato je ostrino sušenja manjša (Gorišek in sod., 1994). Zaradi blagega postopka kondicioniranje po sušenju ni obvezno, dovolj je, da se les po sušenju odloži v klimatiziran prostor, kjer je nato pripravljen za nadaljnjo obdelavo.

2.2.2.3 Vakuumsko sušenje

Vakuumsko sušenje poznamo tudi pod nazivom podtlačno sušenje, temelji pa na dejstvu, da voda v lesu zaradi nižjega tlaka vre pri nižji temperaturi kot 100 °C. Pri sušenju se tlak giblje v območju od 5 do 20 kPa, ki ga pa dosežemo z uporabo črpalke s hidravličnim – vodnim obročem (Gorišek in sod., 1994). Pri tlaku 5,32 kPa pa dosežemo vrelišče vode že pri 30 °C (Novak, 2008).

Sušenje s tem postopkom je hitro, kar za 3- do 5-krat je hitrejše od najpogostejšega konvencionalnega sušenja. Ta način sušenja je tudi bolj primeren za težje sušene lesne vrste ali žaganih sortimentov večjih debelin. Vlažnostni gradient po prerezu lesa je majhen, ker se voda giblje od notranjosti do površine posameznega sortimenta, kjer se potem kondenzira in pri tem navlažuje zunanjo plast, s tem se zmanjšuje vlažnostni gradient. Zunanje plasti sušilnih sortimentov so med sušenjem bolj vlažne kot pri drugih postopkih, zato je padec vlažnosti manjši, pri čemer so tudi napetosti lesa manjše. To pa ni edina prednost vakuumskega sušenja; ključnega pomena je temperatura sušenja, ki je zaradi podtlaka bistveno nižja, kar je zlasti pomembno za temperaturno občutljive lesne vrste. Podtlak ugodno vpliva na pretok vode v lesu, saj je difuzijski koeficient večji kot pri normalnem tlaku (Preglednica 3), kar pospeši gibanje vezane vode.

Preglednica 3: Difuzijski koeficient vezane vode, odvisen od tlaka pri vakuumskem sušenju (Gorišek in sod., 1994).

Tlak [kPa]	8	10	20	40	50	80	100
Dif. koef. 10^{-9} [m ² /s]	1,8	1,2	0,78	0,5	0,41	0,39	0,36

Temperatura uparjanja vode v vakuumski sušilnici je določena s tlakom nasičenja.

Odvisnost temperature od tlaka lahko izrazimo s Clausius-Clapyronovo enačbo (Gorišek, 1993):

$$dp/dt = dh/TdV \quad \dots(2)$$

oziroma:

$$\ln P / d(1/T) = q_i / RT^2 \quad \dots(3)$$

kjer pomenijo:

T...temperatura [K]

p...tlak [Pa]

h...entalpija [J/mol]

V...volumen [m³]

q_i...izparilna toplota [J/mol)

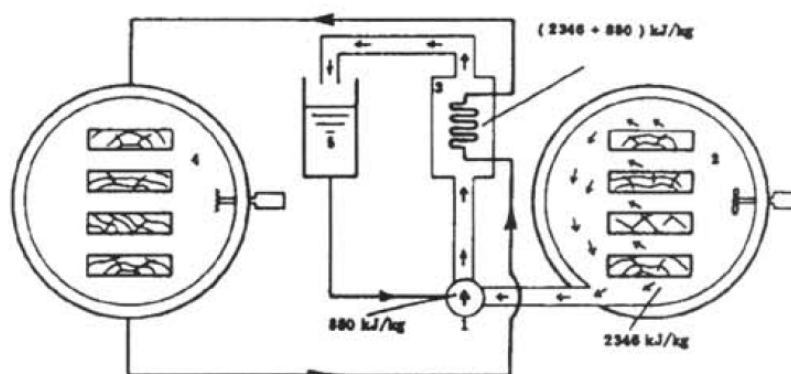
R...plinska konstanta [8,314 J/molK]

Osnovna hiba vakuumskega sušenja je slaba konvekcija toplote, zato je oteženo segrevanje lesa. Uveljavilo se je več postopkov, ki na različne načine rešujejo težavo prenosa toplote:

- nizek toplotni tok se nadomesti z večjo hitrostjo sušilnega medija;
- kontaktno segrevanje lesa s pomočjo grelnih plošč;
- faza segrevanja se vrši ob normalnem tlaku, aktivno sušenje pa v vakuumu;
- vakuumsko sušenje se kombinira z visokofrekvenčnim segrevanjem

(Gorišek, 1993).

Na splošno je vakuumsko sušenje energetsko precej potratno, kar lahko nekoliko omilimo z izmenjevanjem faz segrevanja in sušenja (vakuumom). Ta tehnika nam omogoča tandem izvedbo sušilnih komor (Slika 6), kar pomeni, da je za obe dovolj ena vakuumška črpalka, ki deluje izmenično na eni ali drugi komori. Tako v eni komori poteka faza segrevanja, iz druge pa črpalka črpa zrak in vodno paro (Novak, 2008).



Slika 6: Shema delovanja in prihranek energije pri povratnem izkoriščanju toplote (Gorišek, 1993).

Postavitev tandem izvedbe dveh sušilnih valjev je glede na porabo energije pri konvekcijskem principu vakuumskega sušenja možno povečati z izkoriščanjem povratne toplote (rekuperacija). Ker valja delujeta ciklično preko skupne vakuumške črpalke in izmenjevalnika toplote, se iz valja (kjer poteka faza sušenja) vodi para v toplotni izmenjevalnik, kjer se kondenzira in segreva nasprotni valj. Ko se les v prvem valju zaradi

intenzivnega izhlapevanja v vakuumu ohladi, se fazi zamenjata, vakuum pa se nato izpostavi v drugem valju.

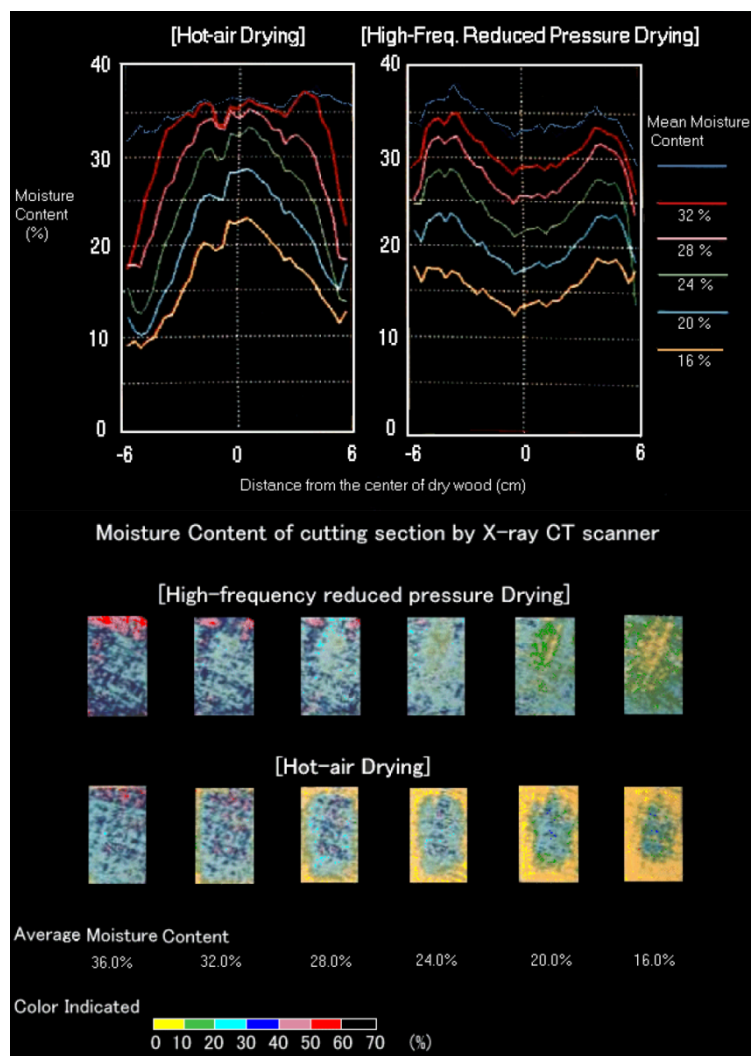
Vakuumsko sušenje je učinkovito zlasti pri sušenju debelejših sortimentih in težje sušičih se lesnih vrstah kot so npr. hrast, bukev, javor,... (Gorišek, 1993).

2.2.2.4 Visokofrekvenčno sušenje

Visokofrekvenčno sušenje je komercialno ime za sušenje v dielektričnem polju visoke frekvence. Sušenje lesa se je pojavilo v zgodnjih 30. letih prejšnjega stoletja. Princip sušenja poteka tako, da se med dve plošči (elektrodi), kateri sta vezani na visokofrekvenčni generator s frekvenco od 2 do 100 Mhz postavi vlažen les, ki deluje kot dielektrik. V njem so polarne skupine, ki so zaradi izmeničnega preklapljanja električnega polja v stalnem gibanju oziroma trenju med seboj, kar povzroči segrevanje lesa. Pri tej tehniki sušenja se vlažen les izredno hitro posuši skozi celoten prerez (Slika 7). Pomembno je omeniti čas sušenja z visoko frekvenco, ki je bistveno krajši kot pri konvencionalnem sušenju. Velja previdnost, da v lesu niso prisotni delci kovin, ki bi omogočili preboj in tako nastanek požara. Urejen in ustrezno zaščiten mora biti sam sušilni prostor, da preprečimo sevanje in vpliv na okolico (Novak, 2008).

Plavčak D. Načela odločanja o tehničnem sušenju v manjših podjetjih.

Dipl. projekt. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za lesarstvo, 2013



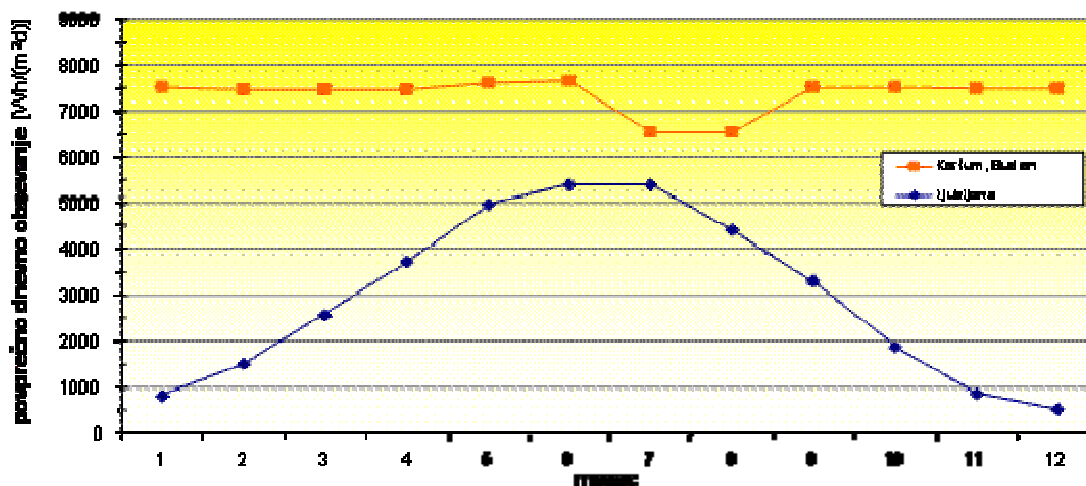
Slika 7: Primerjava vlažnostnih profilov med konvekcijskim sušenjem s toplim zrakom in visokofrekvenčnim sušenjem (Radio frequency..., 2013).

2.2.2.5 Solarno sušenje – sušenje s pomočjo sončne energije

Sušenje lesa zahteva zelo velik delež energije, saj od vse potrebne energije v predelavi lesa porabi od 60 do 70 % zgolj za sušenje (Gorišek in Novak, 1998).

Glede na čas in intenzivnost sončnega obsevanja je Slovenija sončna dežela. Uporaba sončne energije za namen sušenja lesa se pri nas še ni dobro uveljavila zaradi višje investicije in nekoliko daljše amortizacijske dobe. Ocena uporabnosti teh solarnih sistemov za postopek sušenja lesa so za Srednjo Evropo z leti vedno bolj ugodnejše. Sončno obsevanje v Ljubljani traja od 0,88 ure na dan v decembru do 9,19 ure na dan v juliju; tako globalno sončno obsevanje pa doprinese do 5,310 Wh/m²/dan v juliju (Gorišek in Novak, 1998; po Medvedu, 1995).

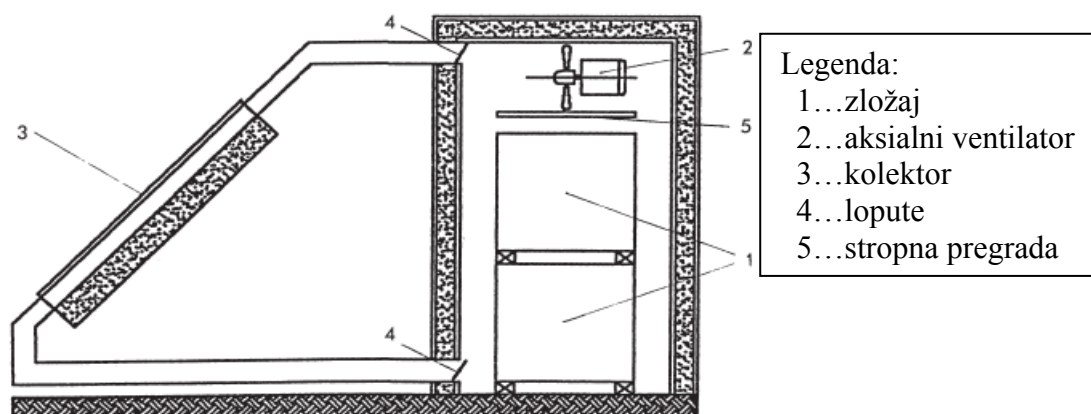
Lokalna letna porazdelitev obsevanja sončne energije je določena s klimatskimi in meteorološkimi dejavniki, leti pa so odvisni od lokacije. Npr. v področjih s večjo količino sončne energije (Sahara) je na razpolago v povprečju dvakrat več energije kot v osrednji Evropi (Slika 8).



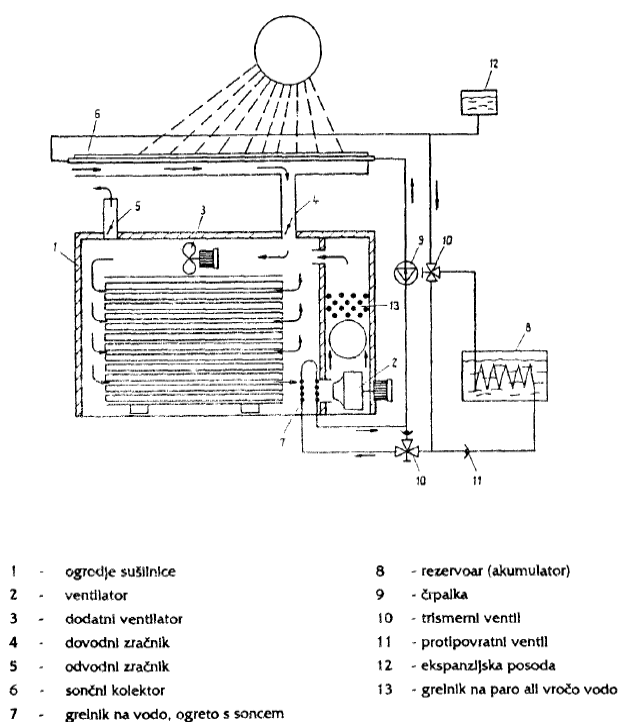
Slika 8: Letna porazdelitev obsevanja na različnih lokacijah: Kartum (Sudan) in Ljubljana.
(Slovenski portal za fotovoltaike..., 2013)

Za solarno sušenje je znanih in izdelanih več različnih sistemov ter tipov teh naprav. Prevladuje kolektorski sistem, ki zbira sončno energijo preko zbiralnikov sončne energije - kolektorjev. To je enostavna naprava sestavljena iz absorberja, steklene plošče in okvirja. Seveda je najpomembnejši vpojnik (absorber) to je bodisi bakrena, železna ali aluminijasta plošča na kateri je še dodatno pritrjena bakrena cev skozi katero se pretaka voda. Da pa ta plošča čim bolje vpija energijo sončnih žarkov, je le ta pobarvana na osvetljeni strani s črno barvo. Segreta voda iz bakrenih cevi nato prihaja do potrošnika (v komoro) ali v zalogovnik. Moč, ki jo sonce odda v obliki toplotne energije na kolektorju znaša nekje $[1 \text{ kW/m}^2]$.

Tudi v solarni sušilni komori se les suši konvekcijsko z zrakom, zato sama oblika sušilnice ne odstopa od drugih komorskih sušilnic in mora biti dobro toplotno izolirana. Pri kolektorskem načinu (Slika 9) se za segrevanje zraka uporabljata dva sistema, kjer se kot delovni fluid lahko uporablja voda (indirektni način) ali pa zrak (direktni način).



Slika 9: Aktivni sončni sistem za sušenje lesa (Gorišek, Novak, 1998).



Slika 10: Kombinirana sušilnica s sončnim kolektorjem in klasičnimi grelniki (Gorišek in sod., 1994).

Pri kombiniranem sušenju (Slika 10) se zrak v sušilnici ogreva s pomočjo kolektorjev in klasičnih grelnikov. Tako ob soncu komoro ogrevamo s pomočjo kolektorjev, hkrati pa se ogreva tudi voda v akumulatorju, kjer se zadrži toplota in z njo ogrevamo sušilnico ponoči. Zaradi neenakomernega dovajanja energije za segrevanje se solarno sušenje pogosto kombinira z ostalimi načini, najpogosteje s kondenzacijskim (Gorišek in sod., 1994).

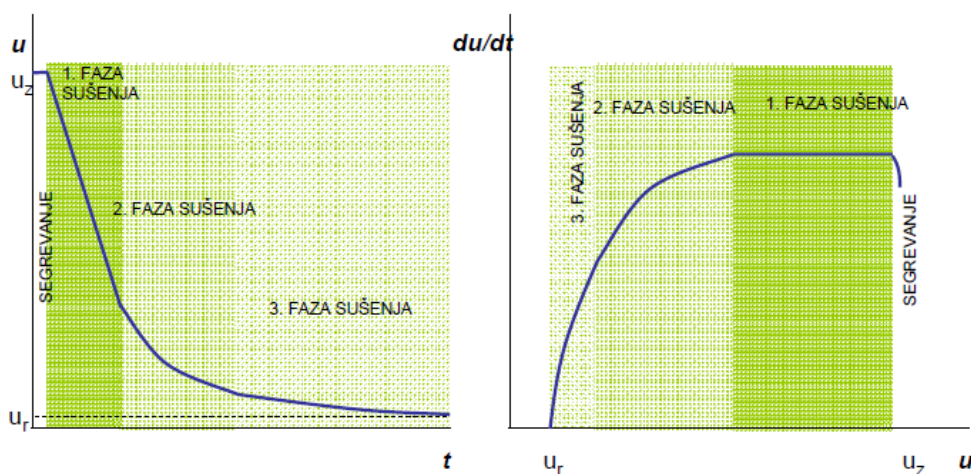
2.3 ČAS IN HITROST SUŠENJA

2.3.1 Mehanizem sušenja

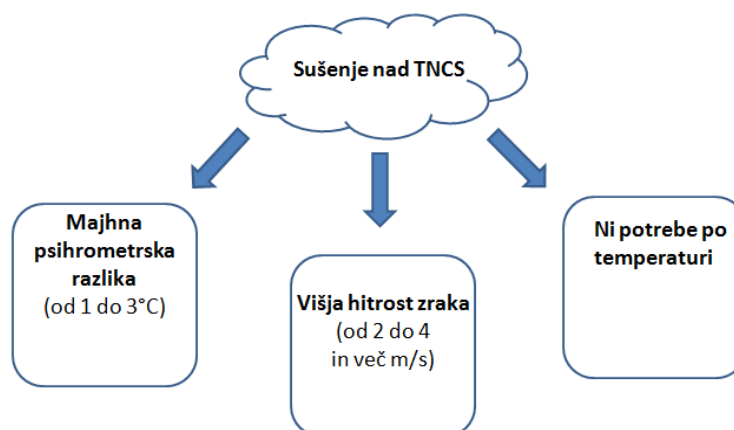
Za katerokoli tehniko sušenja se odločimo, zmeraj strmimo k čim manjši porabi energije, čim krajšemu času sušenja in k čim boljši končni kakovost osušenega materiala. Čas sušenja moramo razumno sprejeti, kajti samo sušenje pomeni izhajanje vode iz lesa, ki je pa še posebej oteženo kadar sušimo na nižjo končno vlažnost, kjer imamo samo še difuzijski tok.

Primerjava časov sušenja se med tehnikami precej razlikuje, vedno pa je odvisen od začetne in končne vlažnosti (Slika 11), kar ponazorimo s sušilno krivuljo. V prvi fazi sušenja izhajanja prosta voda pri konstantni hitrosti sušenja, ki je odvisna od psihrometske razlike in hitrosti zračnega toka (Slika 12). Trajanje prve faze je odvisno od lesne vrste in njene anatomske zgradbe, ki določa prevodnost lesnega tkiva. Pri prehodu v drugo fazo se površina lesa osuši pod TNCS, hkrati se h kapilarnemu toku proste vode pridruži tudi difuzijski tok vezane vode, ki s časom prevladuje. Osušena površina ovira nadaljnjo segrevanje lesa v notranjost, zunanji sloji tako predstavljajo difuzijsko bariero in se hkrati krčijo, kar povzroči generiranje natezne napetosti na površini in tlačnih v sredici.

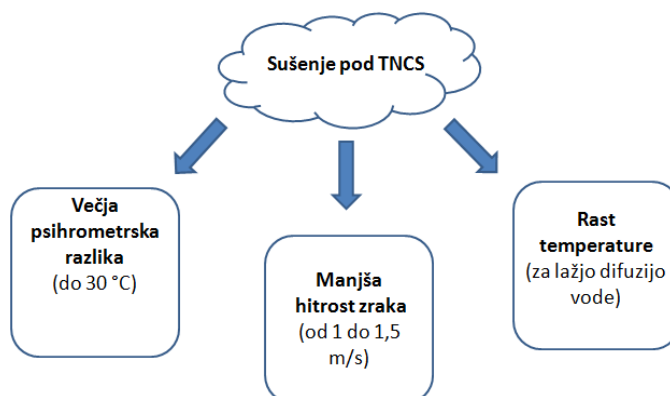
Ko se sredica osuši pod TNCS se prične zadnja tretja faza, kjer hitrost sušenja še upade, v lesu ostane zgolj še difuzijski tok, ki je zlasti odvisen od temperature (Slika 13).



Slika 11: Krivulja sušenja in sušilni diagram (Gorišek, 2012).



Slika 12: Dejavniki, ki določajo hitrost sušenja lesa nad TNCS pri konvekcijskem sušilnem procesu.



Slika 13: Dejavniki, ki pri konvekcijskem sušilnem procesu določajo hitrost sušenja lesa pod TNCS.

2.4 PORABA ENERGIJE

Postopek sušenja lesa sodi med najbolj potraten proces v lesni industriji. Energijske zahteve so tako velike, da od vse potrebne energije v predelavi lesa, kar 60-70 % porabimo samo za sušenje (Gorišek in Novak, 1998). Pri konvencionalnem sušenju večji del tega predstavlja toplotna energija in znaša več kot 80 %, okoli 15 % pa predstavlja poraba električne energije (Straže, 2005). Razmerja med porabljeno toplotno in električno energijo (Preglednica 4) se pri različnih tehnikah sušenja razlikujejo, v manjši meri pa se spremenijo tudi ob dejavnikih, kot so lesna vrsta, začetna in končna vlažnost lesa, stanje sušilne tehnike ipd.. Za primerjavo učinkovitosti postopkov je med najpomembnejšimi kazalniki specifična poraba energije, ki pove količino potrebne energije za izločitev enega kilograma vode. Kot navaja literatura je specifična poraba energije v obratnem razmerju s hitrostjo oziroma časom sušenja.

Plavčak D. Načela odločanja o tehničnem sušenju v manjših podjetjih.

Dipl. projekt. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za lesarstvo, 2013

Preglednica 4: Struktura porabe energije pri različnih postopkih sušenja

Način sušenja	električna energija %	Toplota energija %	vrsta lesa	specifična poraba energije kJ/kg
konvencionalno sušenje	10 - 25	90 - 75	iglavci	3240 - 7200
			listavci	3600 - 10000
kondenzacijsko sušenje	80 - 90	21 - 10	iglavci	2000 - 3600
			listavci	3100 - 6800
vakuumsko sušenje	40 - 50	60 - 45	iglavci	5040 - 6780
			listavci	6240 - 7550
visokofrekvenčno sušenje	100	0	iglavci	x
			listavci	6840

3. METODE

3.1 ANALIZIRANJE PODATKOV ZA DOLOČITEV TEHNIČNEGA SUŠENJA

Pri načelih odločanja za izbiro optimalnega načina izvajanja sušilnega postopka smo s proučevanjem literature in preverjanjem v manjših lesnoindustrijskih podjetjih postavili merila in kriterije, ki so služili kot osnova za objektivno ocenjevanje dejavnikov, ki so relevantni za optimalno izbiro tehnološkega postopka sušenja ali ustrezne tehnike sušenja.

Kot najpomembnejše dejavnike izbire smo postavili:

- Karakterizacija lesa;
- Razpoložljiv prostor za izvajanje sušenja in skladiščenje svežega ali osušenega lesa;
- Tehnike sušenja in njihove kapacitete;
- Oskrba z energijo;
- Stroški nakupa, amortizacije in predvideni obratovalni stroški.

Končno vrednotenje in izbira naj bi temeljila na ekonomičnosti sušilnega postopka, ki je za vsako podjetje specifičen.

4. REZULTATI

4.1 PRIDOBIVANJE OSNOVNIH PODATKOV K ODLOČITVI NAČINA SUŠENJA

Nabava sušilne komore je za majhna podjetja velika investicija, visoki pa so tudi stroški obratovanja, zato je izredno pomembno, da je izbira sušilne tehnologije čim bolj optimalna in ekonomična.

Za ustrezno izbiro tehnologije in tehnike sušenja je potrebno poznati vrsto dejavnikov ter ustrezne kriterije in merila (Preglednica 5), hkrati pa moramo upoštevamo tudi izkušnje v podjetjih, ki so investicije že zaključili. Izbira ni enoznačna, ampak moramo k odločitvi pristopit individualno. Odločitveni kriterij je ekonomičnost.

Za presojo smo določili naslednje kriterije:

- Podatki o lesu (drevesna vrsta in debelina žaganega lesa);
- Začetna in končna vsebnost vlage ter končna uporabnost;
- Določitev velikosti, števila komor in letna količina sušenega lesa;
- Oskrba z energijo in potreben prostor;
- Hipotetični izračun stroškov sušenja.

Preglednica 5: Ustreznost sušilne tehnike ob danih kriterijih

		Sušilna tehnika				
		Konvencionalna	Kondenzacijska	Vakuumska	Visokofrekvenčna	Solarna
Lesna vrsta	iglavci	✓	✓	✓	✗	✓
	listavci	✓	✓	✓	✓	✓
Debelina sortimentov	večjih debelin	✓	✓	✓	✓	✓
	manjših debelin	✓	✓	✓	✓	✓
začetna vlažnost	visoka (svež les)	✓	✓	✗	✗	✗
	nad TNCS (60 %)	✓	✓	✗ (meja 50 %)	✗	✓
	pod TNCS (20 %)	✓	✗	✓	✓	✓
končna vlažnost	pod TNCS (-25 %)	✓	✓	✓	✓	✓
	nizka (8 %)	✓	✗	✓	✓	✓
Toplotna energija	možnost izkoriščanja lesnih ostankov	✓	✗	✓	✗	✗
Ob sušenju se ohrani naravna barva		✓ (kritično)	✓ (kritično)	✓	✓	✓

4.1.1 Karakterizacija lesa

Drevesna vrsta in debelina sortimentov je pomemben podatek pri odločitvi.

Sušenje trdih lesov večjih debelin predstavlja zahtevnejši način sušenja, torej je potrebno upoštevati naslednje:

- Hitrost pretoka zraka skozi zložaj naj bi znašala od 1 do 2 m/s, kar omogoča ustrezna kapaciteta ventilatorjev in njihova inštalirana moč elektromotorjev;
- V primeru konvencionalnega in vakuumskega sušenja je potrebna inštalirana grelna moč grelcev med 0,8 in 1,5 kW/m³. Pri kondenzacijskem sušenju lesa je moč grelnikov lahko še nižja.

Pri sušenju mehkih listavcev in iglavcev manjših debelin predvidevamo lažje sušenje in krajši sušilni cikel:

- Hitrost pretoka zraka skozi zložaj mora biti od 2,5 do 3 m/s, ker voda bolj intenzivno izhaja iz lesa. Pri tem morajo biti nameščeni dovolj močni ventilatorji, ki zagotovijo ustrezno prepihanje po celotni komori;

- Inštalirana grelna moč naj bi znašala od 1,8 do 2,3 kW/m³ lesa pri konvencionalnem sušenju oziroma nekoliko manj pri kondenzacijski tehniki (Gorišek s sod. 1996).

V primeru, ko so potrebe investitorja po sušenju tako trdih in mehkih lesnih vrst, ter različnih debelin žaganic, moramo izbrati tehniko, ki ji je mogoče regulirati hitrost pretoka zraka (z ventilatorji) in pa moč grelcev.

Dodatno:

Za sušenje gostejših lesov je obvezna dodatna oprema za navlaževalnje. Ta med samim procesom sušenja vzdržuje optimalno klimo, ki jo zahteva posamezni sušilni režim in tako se izognemo tveganim napakam med sušenjem.

Za izbiro tehnike sušenja in njeno kapaciteto sta odločilna podatka tudi predvidena **začetna in končna vlažnost lesa**.

Les z visoko lesno vlažnostjo (svež les),

- Za to sušenje bi ustrezala oba nizko temperaturna principa (kondenzacijski in konvekcijski), kjer je temperatura sušilnega zraka v območju od 45 do 50 °C;
- Ustrezala bi tudi solarna tehnika sušenja, ki lahko pri temperaturi okolja od 25 do 30 °C v komori doseže maksimalno do 62 °C.

Sušenje gostejših lesov do nižjih končnih vlažnosti (npr. 8 %):

- Pri teh zahtevah bi bilo najprimerneje izbrati konvencionalno tehniko sušenja. Kajti pri tej so maksimalne temperature med 70 in 90 °C;
- Lahko pa izberemo vakuumsko tehniko sušenja, pri katerem je vrelišče vode zaradi podtlaka krepko pod 100 °C. Zato se omogoča kakovostnejše in hitrejšo sušenje gostejših ter debelejših sortimentov. Seveda je ta tehnika bolj primerna z vidika boljše kakovosti in krajšega časa sušenja, je pa investicijski strošek precej visok.

4.1.2 Določitev velikosti in števila komor ter letna količina sušечеlega lesa

Ko določamo velikost komore, imamo možnost izbire velike ali majhne komore, vsaka posebej pa ima svoje prednosti in slabosti.

Pri majhni komori lažje načrtujemo tehnološki proces v primeru kadar sušimo različne lesne vrste različnih debelin. Ob manjši kapaciteti sušечеlega lesa imamo krajše čase polnjenja in praznjenja komore in ne potrebujemo velikih klimatiziranih prostorov za posušen les. Pri sušenju manjše količine lesa je tudi manjši riziko. Težava pri manjših komorah je, da prav tako zavzamejo velik prostor, investicija je sorazmerno velika za majhno količino sušечеlega lesa, zaradi tega je tudi slabša ekonomičnost.

Večje komore zavzamejo manj prostora glede na neto sušilno kapaciteto, so investicijsko bolj ugodne in zahtevajo nižje stroške obratovanja, kar predstavlja boljše ekonomičnost. Zaradi večje zmogljivosti sušenja je težje načrtovaje tehnološkega procesa, kar predstavlja tudi velik riziko. Časi polnjenja in praznjenja so daljši in za posušen les potrebujemo večji klimatiziran prostor.

Optimalna **velikost komore** pomeni, da je ob polnitvi lesa dosežena nazivna kapaciteta komore. V nasprotnem primeru prihaja do problemov zaradi slabega pretoka zraka skozi zložaje.

- Izbira ene same sušilne komore z večjo kapaciteto je smiselna, ko sušimo konstantno lesno vrsto iste debeline lesa;
- Za sušilničarje, ki sušijo les za naročnike, je primerno izbirati več, kot le eno komoro (npr.: ena majhna in srednja komora);
- V kolikor se suši večje število lesnih vrst in debelin, tudi majhnih količin je smiselno izbrati več manjših sušilnih komor. Ta izbira je zaradi večjega števila komor investicijsko precej dražja, a zagotavlja veliko fleksibilnost, ki je dandanes predstavlja načelo $\square$ just in time $\square$.

4.1.3 Oskrba z energijo in potreben prostor

Tehnični načini sušenja lesa so energetsko zelo potratni, zato je pred odločitvijo potrebno analizirati možnost rabe cenejših, alternativnih virov energije:

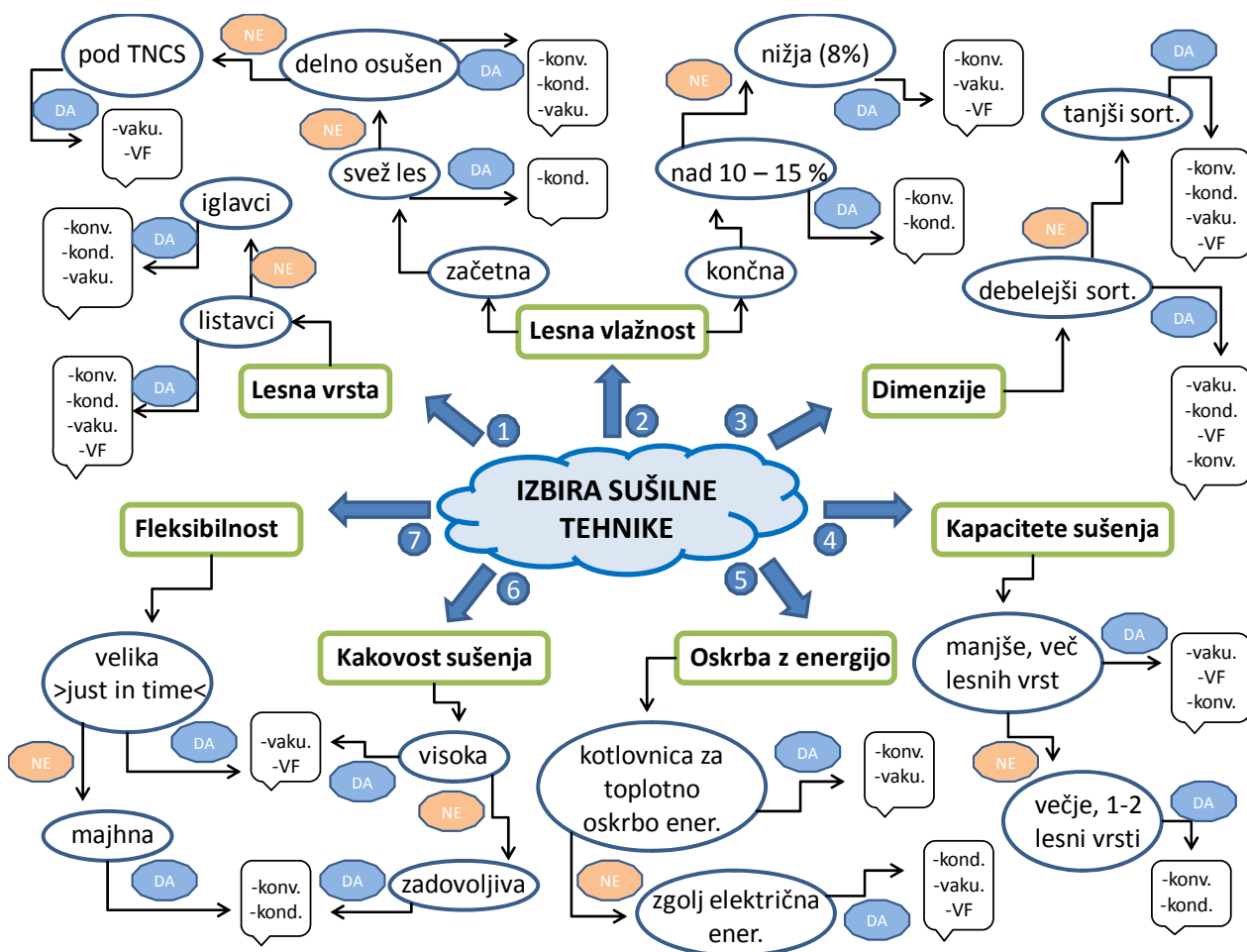
- V situaciji, kjer investitor nima že obstoječe odgovarjajoče energetske infrastrukture ter suši sortimente mehkih listavcev in iglavcev na končno vlažnost lesa med 10 in 20 %. Potem nimamo velike izbire oziroma je racionalno, da se odloči za kondenzacijsko ali solarno sušenje, kjer se kot energetski vir uporablja električna energija pridobljena iz omrežja ali fotovoltaičnih celic. Kapaciteta teh sušilnic naj bi bile manjše od 3 do 6 m³ lesa;
- V kolikor ima investitor že zgrajeno kotlovnico je smotno, da se postavi konvekcijska sušilna komora. Pri teh je kar 80 % potrebe po toplotni energiji, ostalih 20 % odpade na električno energijo.
- Če se investitor namerava skupaj s komoro postaviti tudi kotlovnico in se odloča o izbiri energenta je prav, da zraven investicijskih stroškov za kotlovnico preveri tudi cene energentov. Kateri energenti pa so varčnejši lahko vidimo na sliki 14. Iz tega lahko sklepamo, da je najmanjši strošek pri pridobitvi toplotne energije z uporabo sekancev.

Potratno								Varčno
Energent	Utek, naftni plin	Elektrika	Kurilno olje	Zemeljski plin	Peleti	Toplotna črpalka	Polena - bukova	Sekanci
Enota energenta:	kWh/l	kWh	l	kWh/Sm ³	kg	kWh	pm	kWh/m ³
Kurilnost:	7,23	1,00	10,08	10,08	5,00	1,00	2.410,00	800,00
								kWh / enota energenta

Slika 14: Razpored energentov od potratnega do varčnega (Izbira energenta..., 2013)

4.2 ODLOČITVENI DIAGRAM

Končni odločitveni diagram (Slika 15) je rezultat optimalne izbire sušilne tehnike, katera omogoča vsem uporabnikom, da v osnovi preverijo pravilnost izbire svoje sušilne komore ali tistim, ki se zanjo še odločajo. Diagram nas vodi preko sedmih temeljnih kriterijev in meril, preko katerih spoznamo svojo najbolj ustrezno izbiro. Pri vsaki zaporedni številki vpišemo v tabelo (Preglednica 7) svojo ugotovitev s potrdilom (✓) ali ne-potrdilom (✗) pod vsako tehniko sušenja.



Slika 15: Odločitveni diagram za izbiro sušilne tehnike

Preglednica 6: Odločitvena tabela sušilne tehnike (za izpolnjevanje).

			SUŠILNA TEHNIKA			
Št.	Kriterij		Konvencionalna	Kondenzacijska	Vakuumska	Visokofrekvenčna
1.	Lesna vrsta					
2.	Lesna vlažnost	začetna				
		končna				
3.	Dimenzije					
4.	Kapaciteta					
5.	Energija					
6.	Kakovost					
7.	Fleksibilnost					

PRIMER:

Pri konvencionalnem komorskem sušenju kapacitete 20 m^3 , sušimo smrekovino (*Picea abies* Karst.) debeline 35 mm iz začetne vlažnosti 60 % na končno 11 % vlažnost lesa pri čem nastane 43,33 €/m³ ali 16,05 €/h vseh stroškov. Od tega znaša najvišji delež 73 %, kot strošek toplotne energije (Preglednica 5). Če pogledamo, da je konvencionalna tehnika sušenja v praksi najpogostejše uporabljena je razmišljanje o priskrbi toplotne energije povsem na mestu. Lesno obratovalna industrija se na našo srečo pogostejše srečuje z lesnimi ostanki, kot katerakoli druga panoga. Zato zadostno količino lesnih ostankov pretvorimo v sekance. Teh lesnih ostankov je predvsem zadosti v primarni obdelavi lesa, kjer je povprečni izkoristek lesa nekje med 65 in 70 %, odvisno od načina razreza in izkoristka hlodovine. Ostali delež pretežno predstavljajo lesni ostanki (Gornik Bučar, Merzelj, 1998). Lesni sekanci so tip energenta, kateri je na trgu predstavljen kot precej varčen v primerjavi s ostalimi energenti (Slika 14).

Odločitveni blok, diagram za izbiro sušilne tehnike smo preizkusili v konkretnem podjetju (Preglednica 8), ki predeluje les v embalažo za strojno kovinarska podjetja. Za to pretežno uporabljajo les iglavcev, največ smrekovino in jelovino. Odkupujejo hlodovino lesne vlažnosti nekje 60 %, jo razžagajo in posušijo na nizko končno vlažnost med 8 in 11 % odvisno od želje strank. Njihova komora premore sušiti 20 m^3 lesa ob enem polnjenju, pri kateri bi lahko letno posušili okoli 2500 m^3 , vendar za svoje potrebe letno posušijo zgolj nekje med 500 do 600 m^3 lesa. To podjetje se v osnovi ukvarja s preoblikovanjem kovine in majhnim deležem predelave lesa. Vendar za oskrbo toplotne energije imajo zgrajeno kotlovnico na lesne sekance, kjer obratujeta dve peči moči 500 in 1000 kW. Sušilno komoro pretežno uporabljajo zase, možnost pa obstaja, da lahko tudi od zunaj vsakdo pripelje sušit, saj komora ni polno obremenjena in ni dolgih čakalnih dob. Uporabljajo konvencionalno tehniko sušenja (Slika 16), do te izbire pa nas vodi tudi odločitveni diagram (Preglednica 8), kjer konvencionalna tehnika ustreza številnim kriterijem podjetja.



Slika 16: Konvencionalna sušilna komora podjetja.

Preglednica 7: Določitev sušilne tehnike za naše podjetje.

Št.	Kriterij		SUŠILNA TEHNIKA			
			Konvencionalna	Kondenzacijska	Vakuumska	Visokofrekvenčna
1.	Lesna vrsta		✓	✓	✓	X
2.	Lesna vlažnost	začetna	✓	✓	✓	X
		končna	✓	X	✓	X
3.	Dimenzije		✓	✓	✓	✓
4.	Kapaciteta		✓	✓	X	X
5.	Energija		✓	X	✓	X
6.	Kakovost		✓	✓	X	X
7.	Fleksibilnost		✓	✓	X	X

Pri izbranem podjetju so nas kriteriji vodili k izbiri konvencionalne sušilne tehnike, katera je potrjena s vsemi potrditvami.

4.3 STROŠKI PRI NAJPOGOSTEJE UPORABLJENI KONVENCIONALNI TEHNIKI SUŠENJA

Za hipotetični izračun stroškov (Preglednica 6) smo izbrali konvencionalno sušilno komoro vrednosti okoli 60.000,00 € v kateri je mogoče sušiti 60 m³ lesa. Njene notranje dimenzije so 6,5 m x 7,2 m x 4,1 m in pri optimalnem polnjenju lahko vanjo razporedimo 24 zložajev, z dolžino 4 m ter višino in širino po 1,2 m.

Za sušenje smrekovine (*Picea abies*) iz začetnih 60 % na končnih 11 % lesno vlažnost, potrebujemo nekje 54 ur. Komora pa obratuje 300 dni/leto oz. 7200 ur/leto. Predvidevamo, da je življenjska doba 10 let, torej je:

- odstotek amortizacije 10 %;
- obresti na vezana sredstva so 8,45 %;
- stroški zavarovanja znašajo od 2 do 4 %;
- pomožen les predstavlja v komori letvice, podložne gredice ipd., katere odpišemo na 5 let. Za pomožni les imamo porabljenega 1 m³ lesa, katerega cena znaša 160 €/m³;
- toplotna energija je izračunana na osnovi porabljene energije za izločitev 1 kg vode, to je 1,5 kWh/kg izločene vode, kjer smo dobili največji delež stroškov (Slika 15);
- za električno energijo smo uporabili ceno 0,10 €/kWh, na komori pa so nameščeni ventilatorji priključne moči 15 kW;
- strošek vzdrževanja smo predstavljali 2 % investicijske vsote;

- bruto plača za enega delavca znaša letno 9480 €/leto.

Preglednica 8: Zbrani stroški konvencionalnega sušenja.

Stroški	€/m³	€/h	%
amortizacija	2,25	0,83	5,2
obresti	0,95	0,35	2,2
zavarovanje	0,45	0,17	1
pomožni les	0,015	0,006	0,04
toplota	31,61	11,7	73
elektrika	4,05	1,5	9,3
vzdrževanje	0,45	0,17	1
bruto plače	3,55	1,32	8,2
skupaj	43,325	16,046	100



Slika 17: Stolpčni prikaz deležev stroškov konvencionalnega sušenja

5 RAZPRAVA

Pri izbiri tehnike sušenja lesa se uporabniki v večji meri obrnejo na razne inženiringe, kjer ti komercialni ponudniki podajo svoje ponudbe s strani proizvajalcev tehnične opreme sušilnih naprav. Te so po naših ocenah precej slabo izdelani. V večini so predpostavljeni iz podanih kriterijev o sušeči se surovini in dimenzijah zložaja, ki ga bo stranka sušila. Drugače pa je v ponudbi v glavnem opis opreme in materiala, ki sestavlja to sušilno komoro in seveda cene posameznega modela, kateri je določen z različno veliko kapaciteto in dodatnimi opcijami. Ena izmed slabih strani teh ponudb je, da nekatere, čeprav je med proizvajalcem in uporabnikom slovenski posrednik, pridejo do uporabnika celo v tujem jeziku, kar dodatno oteži razumevanje, kaj šele optimalno izbiro. V ponudbah je v praksi podanih več tipov neke sušilne tehnologije glede na kapaciteto, kjer se pa bodočega uporabnika nikjer ne opozori kako pomembna je izbira velikosti komore. Izbrati je potrebno takšno v katero bo lahko maksimalno napolnil svojo surovino, in bo obratovala nemoteno brez zastojev. V praksi je razvidno, da uporabniki v večini primerov izberejo komoro s preveliko kapaciteto misleč, da bodo nekoč sušil več? Te komore so ob polnjenju posledično ne zapolnjene, kar povzroči neustrezno gibanje zraka, ali se celo napolni z različnimi lesnimi vrstami različnih debelin. Prav tako v ponudbah ne najdemo kako je s lesno vlažnostjo, katero uporabnik želi na koncu sušenja oziroma še prej s kakšno začetno vlažnostjo prične tehnično sušiti. Preko podanih podatkov o materialu, opremi in karakterističnih podatkih lahko uporabnik predvideva kakšne stroške bo imel za m³ posušenega lesa, ki so pri večjih komorah res da nižji a njihov izkoristek delovanja (zasedenost) bi bil precej majhen in nebi obratovali konstantno. Naslednja slaba plat ponudb je pristop komercialnih ponudnikov do uporabnika. Svoje ponudbe po predhodnem povpraševanju pošljejo kar preko spleta oziroma faksa in ni individualnega pristopa k uporabniku, da bi skupaj preko kriterijev in meril določili najustreznejšo in optimalno izbiro.

6 SKLEPI

Za izbiro najprimernejše tehnologije in tehnike sušenja lesa v posameznem lesno predelovalnem podjetju je potrebno definirati dejavnike ter ustrezne kriterije in merila za odločanje.

Najpomembnejši dejavniki odločanje so:

- Karakterizacija lesa;
- Razpoložljiv prostor za izvajanje sušenja in skladiščenje svežega ali osušenega lesa;
- Tehnike sušenja in njihove kapacitete;
- Oskrba z energijo;
- Stroški nakupa, amortizacije in predvideni obratovalni stroški.

Postavljen je bil blok diagram, ki omogoča individualni pristop k izbiri najustreznejše tehnologije in tehnike sušenja za vsak konkretni primer posebej. Končna izbira temelji na ekonomičnosti sušilnega postopka, ki je za vsako podjetje specifičen.

5. VIRI

- Černe T. 2011. Možnost solarnega sušenja v Sloveniji. Diplomski projekt. Ljubljana, BF, Oddelek za lesarstvo: 31 str.
- Čop T. 1996. Kako izbrati pravo sušilnico. V: Sušenje lesa. Kako do posušenega lesa v malih predelovalnicah. Mednarodno posvetovanje sušenje lesa. Ljubljana 19.6.1996
- Geršak M., Velušček V. 2010. Sušenje lesa. Ljubljana, Zveza lesarjev Slovenije, Lesarska založba: 194 str.
- Gorišek Ž. 1993. Vakuumsko sušenje lesa v praksi. Vakuumist, 13, 2: 13-16
- Gorišek Ž., 2012. Sušenje lesa. Zapiski predavanj
- 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., Novak M. 1998. Perspektive uporabe sončne energije za sušenje lesa v Sloveniji. Les, 50, 4: 85-90
- Gorišek Ž., Straže A. 2010. Optimization of energy consumption and costs of wood drying with use of different drying techniques. Zbornik gozdarstva in lesarstva, 92: 57-66
- Gornik Bučar D., Merzel F. 1998. Žagarski praktikum. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 144 str.
- Izbira energenta za čim cenejšo ogrevanje. (2013)
<http://www.ogrevanja.si/> (2.8.2013)
- Novak M. 2008. Sušenje lesa. Višješolski učbenik. Maribor, Lesarska šola, Višja strokovna šola: 131 str.
- Obronek F. 2010. Energijska učinkovitost sušilnega postopka v različnih tehnologijah predelave žaganega lesa. Diplomsko delo. Ljubljana, BF, Oddelek za lesarstvo: 48 str.
- Perré P. 2007. Fundamentals of wood drying. Nancy. A.R.BO.LOR.: 366 str.
- Pervan S. 2000. Priročnik za tehnično sušenje drva. Zagreb, Sand: 260 str.
- Radio frequency vacuum timber dryer hi-elec dryer. (2013)
http://www.fdc.co.jp/products/cat_d/hed/hed3.html (28.7.2013)
- Slovenski portal za fotovoltaike. (2013)
<http://pv.fe.uni-lj.si/Welcome.aspx> (8.8.2013)

Plavčak D. Načela odločanja o tehničnem sušenju v manjših podjetjih.

Dipl. projekt. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za lesarstvo, 2013

Straže A. 2005. Tehnično sušenje lesa – stanje, dileme in razvojne smernice. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, oddelek za lesarstvo. Lesarski utrip, 11, 6: 31-31

ZAHVALA

Posebna zahvala gre mentorju prof. dr. Željku Gorišku za strokovno svetovanje, ter izčrpno pomoč in vodenje diplomskega projekta.

Zahvaljujem se tudi recenzentu doc. dr. Alešu Stražetu za strokovno recenzijo diplomskega projekta.

Na koncu pa bi se zahvalil tudi svojim staršem za vso spodbudo, podporo in finančno pomoč pri študiju.

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Denis PLAVČAK

**NAČELA ODLOČANJA O TEHNIČNEM SUŠENJU
V MANJŠIH PODJETJIH**

DIPLOMSKI PROJEKT

Univerzitetni študij 1. stopnja

Ljubljana, 2013