

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra základního zpracování dřeva



Procesy umělého sušení dřeva

Bakalářská práce

Autor: Michaela Vrátná

Vedoucí práce: Ing. Monika Sarvašová Kvietková, PhD.

2017

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Michaela Vrátná

Podnikání ve dřevozpracujícím a nábytkářském průmyslu

Název práce

Procesy umělého sušení dřeva

Název anglicky

Processes of kiln-drying of wood

Cíle práce

Cílem práce je charakterizovat proces sušení za pomoci sušáren. Rozdělení sušáren a popis jejich jednotlivých částí.

Metodika

Charakteristika a popis umělého sušení, porovnání jednotlivých procesů sušení. Popis chýb vznikajících v procesu umělého sušení. Výhody a nevýhody umělého sušení.

Doporučený rozsah práce

35 – 45 stran

Klíčová slova

sušení dřeva, vlhkost, teplotní spád, sušárna

Doporučené zdroje informací

BOUSQUET, D. W. Drying Wood. Univ. Of Vermont Extension Brieflet 1326. 33 s., 1981.

PELEŠKA, K. Přirozené sušení řeziva. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury. 1963. ISBN L19-B2-IV-31/8561.

SKAAR, Ch. Water in wood. Kalifornská univerzita. 1972. 218 s., ISBN 9780815650348.

TREBULA, P., KLEMENT, I. Sušenie a hydrotermická úprava dreva. Vyd. 2. Zvolen: Technická univerzita Zvolen. 2005. 449 s., ISBN 80-228-1421-0.

ZEJDA, I. J. Sušení dřeva. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. 2009.

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Monika Sarvašová Kvietková, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra základního zpracování dřeva

Elektronicky schváleno dne 3. 5. 2016

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 27. 1. 2017

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 04. 04. 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Procesy umělého sušení dřeva vypracovala samostatně pod vedením Ing. Moniky Sarvašové Kvietkové PhD., a použila jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědoma, že zveřejněním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V..... dne.....

Podpis autora

Poděkování

Mé poděkování patří paní Ing. Monice Sarvašové Kvietkové PhD za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnovala. Dále děkuji rodičům za podporu při mém studiu.

Abstrakt:

V bakalářské práci se zabývám popisem základního procesu sušení od stavby hrání, přes přípravu až k vlastnímu procesu sušení a k závěrečnému konečnému ošetření a to egalizací, zlahodněním a ochlazením. Dále v práci popisuji nejčastěji používané způsoby sušení. Mezi ně patří komorové, kontinuální (tunelové) a vysokoteplotní sušení, ale také speciální způsoby sušení jako například kondenzační, vakuové, kontaktní a mikrovlnné sušení. V další části představuji tři výrobce sušáren. Českou firmu Katres s.r.o., německou firmu Hildebrand Brunner a italskou firmu Nardi Internacional s.r.l.. Z každé firmy jsem vybrala jeden typ komorové sušárny a porovnávala je mezi sebou. Jako porovnávací parametry jsem zvolila rozměry, objem, výkon, počet ventilátorů a cenu. Dále se zabývám návrhem na vylepšení získaných výsledků.

Klíčová slova:

sušení dřeva, vlhkost, teplotní spád, sušárna

Abstract:

In my Bachelor's thesis I occupy on description of basic process of drying starting from construction of the stack, over preparation until indigenous process of drying and towards final treatment by egalization, acclimatisation and by cooling. Further in my thesis I describe the most common ways of drying. The chamber drying, continual(tunnel) and high temperature drying also special methods for example condensing, vacuum, contact and microwave drying. In the next part I present three producers of dryers. Czech company Katres s.r.o., German company Hildenbrand Brunner and Italian company Nardi Internacional s.r.l.. From each company I selected one type of the chamber dryer and compared them. As comparison parameters I selected size, capacity, wattage, number of fans and price. In the end I concern about improvements of the acquired results.

Keywords:

wood drying, moisture, thermal gradient, dryer

Obsah

1. Úvod	10
2. Cíl práce.....	11
3. Přípravné práce	12
3.1. Vyrovnávání řeziva do hraní	12
3.2. Určování počáteční vlhkosti a zhotovení vysoušecích vzorků	12
3.3. Naplánování sušicího procesu.....	13
3.3.1. Doba sušení.....	14
3.3.2. Sušicí řád.....	14
3.4. Příprava sušárny k sušení	16
3.5. Pohyb vzduchu a vody ve dřevě.....	16
3.5.1. Měření.....	16
3.5.2. Teplota vzduchu.....	16
4. Proces sušení.....	18
4.1. Ohřev.....	18
4.2. Vlastní sušení	19
4.2.1. Tepelně-vlhkostní úprava v procesu vlastního sušení	20
4.3. Konečné ošetření.....	21
4.3.1. Egalizace vlhkosti	21
4.3.2. Zlahodnění	22
4.4. Ochlazení.....	23
5. Sušárny	23
5.1. Komerové sušení.....	23

5.1.1.	Nízkokapacitní sušárny.....	23
5.1.2.	Vysokokapacitní sušárny	24
5.2.	Kontinuální (tunelové) sušení	25
5.3.	Vysokoteplotní sušení	26
5.4.	Speciální způsoby sušení.....	27
5.4.1.	Kondenzační sušení	27
5.4.2.	Vakuové sušení	29
5.4.3.	Sublimační sušení	33
5.4.4.	Kontaktní sušení	34
5.4.5.	Rotační sušení	36
5.4.6.	Indukční sušení	37
5.4.7.	Dielektrické sušení.....	38
5.4.8.	Infračervené sušení	40
5.4.9.	Sušení v kapalinách	40
5.4.10.	Kombinované sušení.....	42
6.	Porovnání sušáren	43
6.1.	Firma Katres s.r.o.....	43
6.2.	Firma Hildebrand Brunner	43
6.3.	Firma Nardi Internacional s.r.l.....	43
6.4.	Grafické porovnání dle jednotlivých parametrů	44
6.5.	Výsledek z porovnání.....	47
	Metodika	48
	Diskuze	48
	Závěr	49
	Bibliografie	51
	Internetové zdroje	52

Seznam obrázků

Obrázek 1 Zhotovení vlhkostních a vysoušecích vzorků	12
Obrázek 2 Psychrometr.....	17
Obrázek 3 Možný průběh teploty a relativní vlhkosti vzduchu v průběhu sušení.....	20
Obrázek 4 Rozdělení vlhkosti na příčném řezu dřeva	22
Obrázek 5 Malá sušárna řeziva	24
Obrázek 6 Kondenzační sušárna s tepelným čerpadlem a s částečným odvlhčením vzduchu.....	28
Obrázek 7 Příčný řez vakuovou sušárnou s kontaktním ohřevem.....	31
Obrázek 8 Schematické znázornění sublimačního sušení	34
Obrázek 9 Spirálová odstředivka.....	37
Obrázek 10 Mikrovlnná sušárna	40

Seznam tabulek

Tabulka 1 Příklad vlhkostního sušícího řádu pro smrkové řezivo tloušťky 15 – 30 mm a pro bukové řezivo tloušťky 15 – 30 mm.....	15
Tabulka 2 Příklad časového sušícího řádu pro bukové řezivo tloušťky 15 – 30 mm, předsušené na 35 %.....	15
Tabulka 3 Klasifikační schéma vakuových způsobů sušení.....	30
Tabulka 4 Typy komorových sušáren, jejich parametry a cena	44
Tabulka 5 Celkové porovnání.....	47

Seznam grafů

Graf 1 Porovnání rozměrů sušáren	44
Graf 2 Porovnání objemu sušáren.....	45
Graf 3 Porovnání výkonu sušáren.....	45
Graf 4 Porovnání dle počtu ventilátorů v sušárnách.....	46
Graf 5 Porovnání cen sušáren	46

1. Úvod

K umělému sušení dřeva je potřeba naplánovat sušící proces, ale ještě před ním je potřeba uskutečnit pár přípravných prací. Je potřeba řezivo vyrovnat do hrání a určit jeho počáteční vlhkost a teprve poté se může začít plánovat. Po celkovém naplánování začíná proces sušení a nakonec konečné ošetření. V práci jsou právě tyto činnosti základního procesu sušení vysvětleny.

Umělé sušení dřeva se nejčastěji provádí v komorových, kontinuálních (tunelových) a vysokoteplotních sušárnách. Dále se také používají speciální způsoby sušení, které probíhají v kondenzačních, vakuových, sublimačních, rotačních, dielektrických, kontaktních a indukčních sušárnách. Mezi speciální způsoby také patří sušení v kapalinách a kombinované sušení. Tyto způsoby jsou v práci popsány i se svými výhodami a nevýhodami.

Katres s.r.o., Nardi Internacional s.r.l. a Hildebrand Brunner jsou firmy, které se právě sušením dřeva zabývají několik let. Vytvírají nejnovější technologie a počítačové ovládání do sušáren, ale především sušárny jako takové. Aktuálně se snaží o snížení emisí, úspory energie a přispívají tím k dosažení ambiciózních klimatických cílů.

Téma proces sušení jsem si vybrala, protože je to jedna z nejdůležitějších operací při zpracování dřeva. Tato operace se provádí po pořezu. Dřevo se k jakémukoliv dalšímu využití musí nejdříve vysušit, po vysušení se mění jeho rozměrové a tvarové vlastnosti. Přebytná voda ve dřevě způsobuje poškození nebo napadení houbami. Když se dřevo vysouší příliš rychle, vznikají deformace, pokud se vysouší příliš pomalu, tak se zvyšuje riziko napadení dřevokaznými houbami či plísní. Právě proto je sušení řeziva tak důležitý proces.

2. Cíl práce

Cílem práce je charakterizovat proces sušení za pomoci sušáren. Rozdělení sušáren a jejich popis. Charakterizovány byly přípravné práce a plánování procesu, samotný proces sušení a konečné ošetření. Způsobů sušení je mnoho a popisu je práci věnována velká část.

Dalším cílem bylo popsání tří firem a to Katres s.r.o., Nardi Internacional s.r.o. a Hildebrand Brunner. Vybrání sušáren od těchto tří firem a určení parametrů k porovnání. Cílem porovnání bylo zjištění, která ze tří sušáren je podle těchto parametrů nejlepší a tím pomoci s výběrem.

3. Přípravné práce

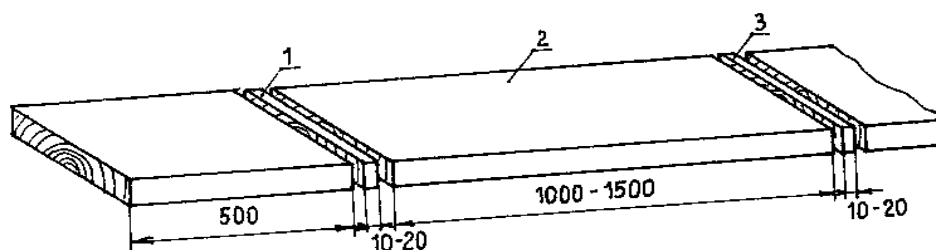
3.1. Vyrovnávání řeziva do hrání

Aby nedocházelo k podélnému borcení řeziva vyrovnáváme ho do dostatečně dlouhých a stabilních hrání na sušárenské vozíky. Při jednosměrném proudění vzduchu nesmí mít hrání šířku větší než 150 cm (z důvodu rovnoměrnosti sušení řeziva na straně vstupní a výstupní) a 180 cm při dvousměrném proudění vzduchu. Rovnoměrnost proudění vzduchu po výšce hrání ovlivňuje maximální výšku hrání a to do 170 cm. Délku hrání ovlivňuje délka sušeného řeziva. V hrání se mezi jednotlivé vrstvy řeziva dávají proklady. V sušárně mohou být stejné dřeviny anebo dřeviny tzv. sušárensky příbuzné, mezi ně patří jedle a smrk. Do hrání se ale ukládají pouze stejné dřeviny se stejnou počáteční vlhkostí a o stejné tloušťce (Kadleček, 1980).

Pokud sušíme drahé řezivo a chceme předejít příčnému borcení, tak se vrchní vrstva zatíží. Při vyrovnání řeziva se vybírá nejvlhčí a nejsušší kusy řeziva a udělají se z nich vysoušecí vzorky pro kontrolu sušení a pro zjištění počáteční vlhkosti vzorky vlhkostní (Peleška, 1963).

3.2. Určování počáteční vlhkosti a zhotovení vysoušecích vzorků

Z řeziva se odřežou části (většinou taková, aby šla ještě využít) nejméně 500mm od čelního konce (po předsušení mají čelní konce většinou nižší vlhkost). Po odřezání konců řezivo použijeme na vysoušecí a vlhkostní vzorky. Vlhkostní vzorky nám slouží pro určení počáteční vlhkosti. Zkouška se provádí vlhkoměrem (5-8 měření), anebo vážením (3-5 vzorků). Zkouška vážením je přesnější. Provádí se s předstihem před začátkem sušení, protože zkouška trvá několik hodin (Hulinský & Bittmann, 2009).



Obrázek 1 Zhotovení vlhkostních a vysoušecích vzorků

Zdroj: (Vinter, 2015)

1,3 - vlhkostní vzorek, 2 - vysoušecí vzorek

Ze stejného řeziva jako vlhkostní vzorky jsou i vysoušecí vzorky. Jejich délka je 1000-1500mm. Pro přesnější hodnoty je lepší, když je vzorek delší, kratší vzorky vysychají rychleji. Aby čela vzorků nevysychala tak rychle, natírají se latexovou barvou. Vzorky se po zvážení do sušárny umísťují na tři místa a to na vstupní stranu hráně, doprostřed a na výstupní stranu hráně (z důvodů zjištění možných rozdílů v sušení). Při každém sušení se tedy používají nejméně tři vzorky. Nad vzorky jsou proklady o polovinu tenčí, aby se daly při kontrole dobře vyndat. Hmotnost, která se zjistí, se zapisuje jak na vzorky, tak i do sušárenských záznamů. Pro každý vysoušecí vzorek je potřeba vypočítat jeho suchá hmotnost (1) (hmotnost v absolutně suchém stavu). Ta se počítá ze zjištěné hmotnosti vysoušecího vzorku a z procenta vlhkosti zjištěného z vlhkostních vzorků. Z vypočítané suché hmotnosti se dále počítá hmotnost vzorku při jednotlivých kontrolních vlhkostech a při konečné vlhkosti (2), kterou chceme sušením získat (Vinter, 2015).

$$M_0 = \frac{M_w \times 100}{W + 100} [g] \quad (1)$$

$$M_k = M_0 + \left(\frac{M_0 \times K}{100} \right) [g] \quad (2)$$

Rovnice 1 Výpočet suché a konečné hmotnosti

M_w = počáteční hmotnost sušícího vzorku, W = počáteční vlhkost zjištěná pomocí vlhkostních vzorků, K = kontrolní nebo konečná vlhkost, M_0 = hmotnost absolutně suchého vysoušecího vzorku, M_k = hmotnost vzorku při kontrolních vlhkostech nebo při konečné vlhkosti

3.3. Naplánování sušícího procesu

Každý sušící proces má jiné podmínky. Suší se odlišné dřeviny, rozdílné tloušťky, apod. Tlustější buněčné stěny dřeva proudící vlhkosti kladou větší odpor než tenké s menší hustotou, takže čím vyšší má dřevo hustotu, tím hůře a pomaleji se suší. Ve dřevě s vyšší hustotou je obsaženo více vody vázané než ve dřevě s menší hustotou, takže se z něj při sušení vypaří více vlhkosti. Například po vysušení 1 m³ bukového řeziva z 60 % na 10 % vlhkosti, se vypaří ze dřeva asi 340 kg vody, ale ze stejného množství smrkového řeziva se vypaří jen 215 kg vody (Vinter, 2015).

Jehličnaté dřeviny se mohou sušit při vyšších teplotách než listnaté dřeviny. Syrové dřevo vysychá rozdílně než předsušené a tenké jinak než tlusté a podobně. Z toho vyplývá, že každá tloušťka řeziva, dřevina, apod. vyžaduje rozdílné podmínky

vysoušení. Každé řezivo nejde sušit ve stejných podmínkách, proto se jednotlivé procesy musí naplánovat (Vinter, 2015).

Plánování sušícího procesu:

- stanovení doby sušení,
- vypracování nebo určení sušícího řádu (včetně sušárenských výpočtů),
- založení záznamu o sušení, který se během sušení doplňuje (Vinter, 2015).

3.3.1. Doba sušení

Hospodárnost sušení se posuzuje podle jednoho z nejdůležitějších ukazatelů, a to podle doby sušení. Zjišťuje se z tabulek a výpočtem.

Doba sušení je složena z:

- vlastní doba sušení,
- doba potřebná na ohřev řeziva,
- konečné ošetření.

V tabulkách je pro každý druh a tloušťku dřeviny stanovena základní doba sušení. Stejně tak jsou v tabulkách stanoveny opravné koeficienty pro hlavní i vedlejší vysoušecí podmínku. Těmito opravnými koeficienty se násobí základní doba sušení. Vysoušecí podmínky se musí zohledňovat, protože na nich závisí doba sušení (Vinter, 2015).

3.3.2. Sušící řád

Rozepsané a sestavené údaje vlhkostí vzduchu a teplot v sušárně pro jeden sušící proces. Sušící řády rozlišujeme na vlhkostní a časové, podle toho na čem závisí a jak jsou sestavené. Hodnoty psychrometru u vlhkostního sušícího řádu jsou rozepsané podle změny vlhkosti sušeného materiálu. Podle toho jak klesá vlhkost dřeva při sušení podle vlhkostního řádu, tak se mění vlhkost a teplota vzduchu. Pravidelným vážením vlhkostních vzorků se kontrolují změny vlhkosti (Trebula & Klement, 2002).

Tabulka 1 Příklad vlhkostního sušícího řádu pro smrkové řezivo tloušťky 15 – 30 mm a pro bukové řezivo tloušťky 15 – 30 mm

Zdroj: (Vinter, 2015)

SM / JD / BO / (DG, VJ)							BK / JS / Kaštan jedlý						
Vlhkost dřeva, při které se mění klima v sušárně - %	Tloušťka řez. 15 - 30 mm						Vlhkost dřeva, při které se mění klima v sušárně - %	Tloušťka řez. 15 - 30					
	Suš. Měkké			Suš. tvrdé				Suš. Měkké			Suš. Tvrdé		
	t_s	t_v	p_r	t_s	t_v	p_r		t_s	t_v	p_r	t_s	t_v	p_r
	°C	°C	°C	°C	°C	°C		°C	°C	°C	°C	°C	°C
čerstvé	70	64	6	80	72	8	čerstvé	60	57	3	70	68	2
60	70	64	6	80	72	8	60	60	57	3	70	68	2
50	75	68	7	80	72	8	50	60	56	4	70	67	3
40	75	67	8	80	71	9	40	60	56	4	70	66	4
30	80	69	11	80	65	15	35	60	54	6	70	64	6
25	80	65	15	85	65	20	30	65	57	8	70	60	10
20	85	65	20	90	65	25	25	70	59	11	75	59	16
15	90	65	25	90	65	25	20	70	55	15	80	60	20
10	90	65	25	90	65	25	15	75	55	20	85	60	25
							10	75	55	20	85	60	25

Psychrometrické rozdíly a rozdíly teploty vlhkého a suchého teploměru jsou u časového sušícího řádu rozepsané v určitých časových intervalech. Vlhkost a teplota vzduchu se při sušení podle časového řádu mění v těchto intervalech bez ohledu na vlhkost dřeva (Vinter, 2015).

Tabulka 2 Příklad časového sušícího řádu pro bukové řezivo tloušťky 15 – 30 mm, předsušené na 35 %

Zdroj: (Vinter, 2015)

Rozsah vlhkosti [%]	Hodiny, po které udržujeme stejné klima [hod.]	t_s [°C]	t_v [°C]	p_r [°C]
35 - 30	19	70	64	6
30 - 25	13,9	70	60	10
25 - 20	16,9	75	59	16
20 - 15	21,3	80	60	20

3.4. Příprava sušárny k sušení

Příprava sušárny zahrnuje:

- kontrolu ventilátorů, elektroměrů, topného zařízení, těsnění dveří a klapek komínů,
- kontrolu ovínky vlhkého teploměru psychrometru a doplnění vody do nádoby,
- zavezení vozíků s hraněmi do sušárny,
- zavření a utěsnění dveří,
- uzavření všech komínů (Valchař, 1967).

3.5. Pohyb vzduchu a vody ve dřevě

3.5.1. Měření

Při probíhajícím sušícím procesu se měří teplota a vlhkost vzduchu, vlhkost řeziva, rychlost proudění vzduchu a spotřeba páry a elektrické energie (Bollmann, 1977).

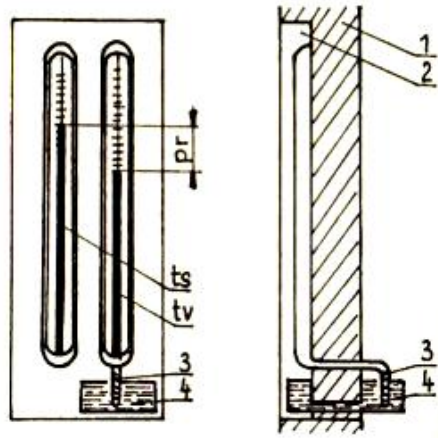
3.5.2. Teplota vzduchu

Měří se kapalinovým (rtuť, líh) nebo odporovým teploměrem. Kapalinové teploměry se používají pro přímé odečítání hodnot a odporové teploměry jsou spojené s registračním přístrojem. Termoelektrické teploměry se používají v automatických sušárnách (Hulinský & Bittmann, 2009).

3.5.2.1. Vlhkost vzduchu

Vlhkost vzduchu měříme nejčastěji pomocí psychrometru se dvěma teploměry. Je dálkově registrační, anebo se používá jako pro přímé odečítání hodnot. Ve vnějším výklenku stěny sušárny má psychrometr umístěné dva kapalinové teploměry. Jejich funkční část, která vede skrz stěnu měří teplotu uvnitř. Suchá teplota vzduchu se měří jedním teploměrem (tzv. suchý teploměr) a sníženou vlhkou teplotu měříme druhým teploměrem (tzv. vlhký teploměr). Konec je ovinut ovínkou z gázy (punčoškou). Dá se použít i jiný materiál než gáza. Do destilované vody je ponořen konec ovínky z které se odpařuje voda a ubírá teplo. Čím sušší a teplejší je v sušárně vzduch, tím více se o ovínky odpařuje voda a chladí tak vlhký teploměr. Rozdílu mezi naměřenými hodnotami se říká psychrometrický rozdíl. Vlhkost vzduchu se určí z tabulek pomocí psychrometrického rozdílu a hodnoty suché teploty. Aby určená vlhkost byla směrodatná a pro další řízení sušícího procesu a hodnoty vlhkého teploměru byly

správně určeny, musí se stále kontrolovat množství destilované vody a dle potřeby dolévat. Proces sušení se řídí podle vzduchu, který vstupuje do hrání a proto se psychrometr dává na vstupní stranu sušárny (Matovič, 1988).



Obrázek 2 Psychrometr

Zdroj: (Hulinský & Bittmann, 2009)

ts - suchý teploměr, tv - vlhký teploměr, pr - psychrometrický rozdíl, 1 - stěna sušárny, 2 - výklenek ve stěně sušárny, 3 - ovínka vlhkého teploměru, 4- nádobka s destilovanou vodou

3.5.2.2. Vlhkost řeziva

Před sušením se měří, aby se zajistila počáteční vlhkost řeziva, v průběhu se měřením řezivo kontroluje a na konci sušení je potřeba ověřit, jestli má řezivo požadovanou konečnou vlhkost. Měří se vážením, pouze pokud má řezivo vlhkost pod BNV (bod nasycení vláken), tak se může měřit vlhkoměrem (Skaar, 1972).

3.5.2.3. Vznik a přenos tepla na řezivo

- proudění (konvekce),
- vedení (kondukce),
- záření (radiace) (Zejsa, 2009).

3.5.2.4. Teploty sušení

- sublimační: okolo -30 až -40 °C,
- nízkoteplotní: 0 až 40 °C,
- teplovzdušné: 40 až 100 °C,
- vysokoteplotní: 100 až 130 °C (Zejsa, 2009).

3.5.2.5. Rychlost proudění vzduchu

Měří se na začátku procesu sušení na výstupní straně hrání, až po té co se sušící prostor zaplní. Měří se pomocí anemometru, jeho otáčky se převádějí na rychlost (Hulinský & Bittmann, 2009).

4. Proces sušení

Proces sušení můžeme rozdělit do čtyř úseků

1. ohřev
2. vlastní sušení
 - $w > BNV$
 - $w < BNV$
3. konečné ošetření
 - egalizace
 - zlahodnění
4. ochlazování

4.1.Ohřev

Po zavezení řeziva do sušárny je první technologickou operací ohřev. Při počáteční vlhkosti nad BNV se proces ohřevu uskutečňuje bez změny vlhkosti. Předpokládá se, že se ohřev uskutečňuje za pomoci dvou jevů: tepelnou vodivostí dřeva a přestupem tepla z prostředí do dřeva. Při ohřevu dochází kromě pohybu vody ve dřevě i k částečnému sušení (Trebula & Klement, 2002).

Teplota prostředí t_s při ohřevu řeziva závisí na druhu dřeviny, tloušťky a kategorie režimu sušení a má být vyšší než teplota prvního stupně sušení, kvůli rychlému dosažení první plánované teploty sušení. Při ohřevu se musí vzduch vlhčit, jinak by se ještě před prohřátím středových vrstev začaly povrchové vrstvy předčasně vysoušet. Jak dlouho trvá fáze ohřevu závisí na tloušťce materiálu. Z pravidla se počítá, že 1 cm tloušťky řeziva je potřeba ohřívát 1 hodinu a počítá se od dosažení předepsané teploty (Vinter, 2015).

Po dosažení dané teploty se udržuje předepsaný psychrometrický rozdíl až do té doby, dokud rozdíl teplot mezi teplotou prostředí a ve středu materiálu t_c nedosáhne 5 °C u jehličnatého řeziva a 2 °C u listnatého řeziva. Když řezivo dosáhne na sušícím

řádem předepsanou teplotu, je potřeba přivřít ventily od topení. Psychrometrický rozdíl a teplota se dále po celou dobu ohřevu udržuje. Poté se přechází na první stupeň sušení. Psychrometrický rozdíl závisí od počáteční vlhkosti vysoušeného materiálu, dřeviny a rychlosti proudění. Čas ohřevu závisí na druhu dřeviny, rozměru, teploty dřeva a prostředí, vlhkosti dřeva, šířky hraně a rychlosti sušícího prostředí (Trebula & Klement, 2002; Vinter, 2015).

4.2. Vlastní sušení

V závislosti od účelu použití sušení máme vlhkosti:

-transportní

-technickou - a) výrobní vlhkost (v procesu sušení)

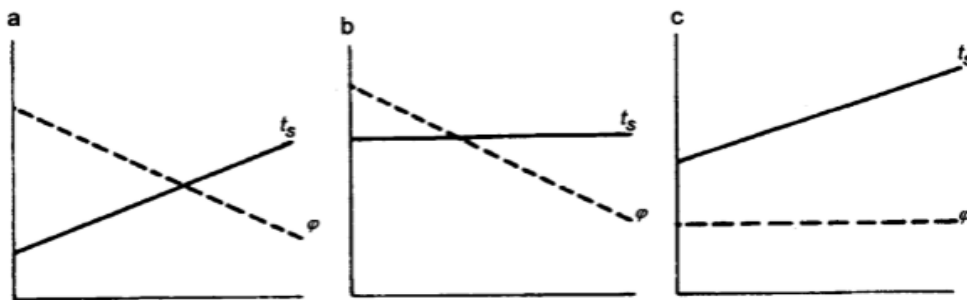
b) vlhkost hotových výrobků.

Rozpis teplot v sušárně je závislý na dřevině její tloušťky, vlhkosti a požadované kvalitě. V průběhu sušení při vlhkosti $w > BNV$ zvyšujeme relativní vlhkost vzduchu. Rychlost sušícího prostředí je vyšší a teplota je nižší v porovnání s procesem sušení pod $w < BNV$. Když je vlhkost dřeva na celém přířezu pod BNV zvyšujeme teplotu a snižujeme relativní vlhkost a rychlost sušícího prostředí (Bousquet, 1981).

Režim se určuje v souladu s druhem dřeviny, její vlhkostí, tloušťky, požadované kvality a typem sušárny. Když zohledníme stav materiálu a k němu požadované kvalitativní požadavky, vybereme takový sušící režim, který zabezpečuje vysušený materiál požadované kvality při minimálním čase sušení.

Čím větší hustotu a tloušťku materiál má tím vyšší je nebezpečí vzniku trhlin, proto je sušení těchto materiálů potřeba zvolit nižší teplotu a menší psychrometrický rozdíl.

Různé způsoby postupu průběhu t_s a φ v procesu sušení.



Obrázek 3 Možný průběh teploty a relativní vlhkosti vzduchu v průběhu sušení

Zdroj: (Kollmann, 1965)

a - $t_s \uparrow$, $\varphi \downarrow$

b - $t_s = \text{konst.}$, $\varphi \downarrow$

c - $t_s \uparrow$, $\varphi = \text{konst.}$

Změna parametrů sušicího prostředí v závislosti od vlhkosti dřeva může být dvou a více stupňová. Například: dvojstupňový režim sušení mění parametry sušicího prostředí při přechodu odpařování vody volné a vázané, trojstupňový který má přechodnou vlhkost 35 a 25 %, to znamená, že při vlhkosti dřeva do 35 % je teplota t_{s1} a psychrometrický rozdíl Δt_{s1} při $w = 35-25$ % je t_{s2} a Δt_{s2} a při vlhkosti 25 % a méně je teplota t_{s3} a Δt_{s3} .

V tunelových sušárnách s příčnou cirkulací vzduchu, které mají regulované parametry sušicího prostředí v jednotlivých zónách se používají režimy sušení, které jsou určené pro periodické komorové sušárny. V první (vstupní) zóně se udržují parametry prvního stupně režimu sušení a v poslední (na výstupní straně) parametry posledního stupně. Ve středních zónách se udržují stěrní parametry sušicího prostředí odpovídající vlhkosti materiálu (Kruml, 1974).

V protiproudových sušárnách se úprava sušicího prostředí provádí jen před výstupní stranou (na suchém konci), takže vzduch do sušárny vstupuje s konstantními parametry. Stav vzduchu po délce sušárny se mění bez přechodného regulování jen v důsledku odpařování vody ze dřeva. Teplota vlhkého teploměru zůstává přibližně stejná.

V jedné sušárně se dovoluje současně sušit materiál stejných vlastností (stejná dřevina, tloušťka, počáteční a konečná vlhkost a kvalita) (Trebula & Klement, 2002).

4.2.1. Tepelně-vlhkostní úprava v procesu vlastního sušení

Uskutečnit proces sušení bez vzniku vnitřního napětí ve dřevě nejde. Proces sušení můžeme však řídit tak, aby při dostatečně vysoké intenzitě sušení, vznikající

vnitřní napětí nepřevýšilo mez pevnosti dřeva. Neporušení materiálu při sušení můžeme zajistit periodickým snížením a zvýšením napětí ve dřevě dočasnou tepelně-vlhkostní úpravou (mezi-úprava, rozprašená voda nasycená pára apod.).

Když se při sušení objeví značné vnitřní napětí, materiál podrobíme tepelně-vlhkostní úpravou vzduchu o zvýšené teplotě a vlhkosti. Většinou se vykonává na řezivu tvrdých listnatých dřevin, větších přířezech jehličnatých dřevin a vyšších požadavcích na kvalitu. Tepelně-vlhkostní úpravu uskutečňujeme ve druhé polovině procesu sušení víckrát v závislosti od míry vzrůstu napětí ve dřevě. Uskutečňuje se při přechodu z vody volné na vodu vázanou (Dekrét & Trebula, 1997).

Psychrometrický rozdíl se nastaví tak, aby se vyloučila možnost odpařování vody ze dřeva, v druhé polovině úpravy se může připustit malé zvýšení vlhkosti povrchových vrstev. Mezi-úprava se provádí do té doby, než se dosáhne napětí ve dřevě. Teplota sušícího prostředí se zvýší v porovnání se současným režimem sušení, ale ne nad 100 °C. Psychrometrický rozdíl je malý. V některých normách se předepisuje zvýšení vlhkosti sušícího prostředí tak, že vyhřívací tělesa se uzavrou a paří se.

Tepelně-vlhkostní úprava není prostředek, kterým můžeme napravit všechny chyby dřeva. Může mít dokonce i špatné následky, pokud se tento proces vykoná chybně a ne ve správný čas (Trebula & Klement, 2002).

4.3.Konečné ošetření

Provádí se pro vyrovnání vlhkosti jednotlivých kusů řeziva, vlhkosti mezi středovou a povrchovou vrstvou řeziva (odstranění vlhkostního spádu, zlahodnění). Popřípadě se dřevo napařuje, aby nedocházelo ke kornatění (Vinter, 2015).

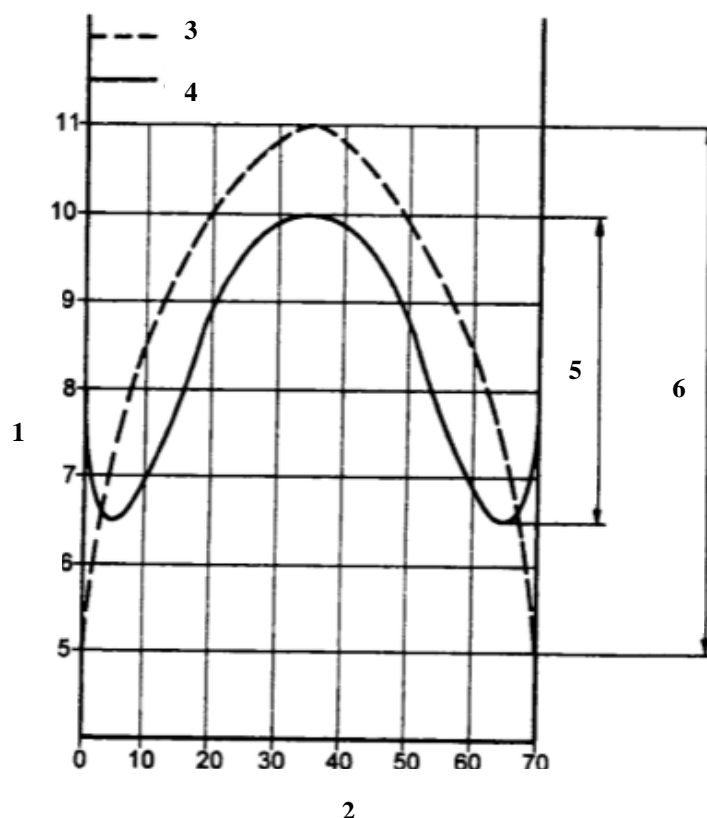
4.3.1. Egalizace vlhkosti

Na konci sušícího procesu se jednotlivé kusy řeziva od sebe liší rozdílnou vlhkostí. Je to způsobené rozdílnou počáteční vlhkostí. Při sušení řeziva nad 12 % je dosažení rovnoměrné vlhkosti obtížné.

Parametry sušícího prostředí po dobu egalizace se nastavují takové, aby se v sušárně nedosušené řezivo dosušilo a přesušené aby zvyšovalo svojí vlhkost. Teplota sušícího prostředí je obvykle vyšší než je poslední stupeň sušení a stupeň nasycení má odpovídat rovnovážné vlhkosti rovné konečné vlhkosti, kterou zvýšíme asi o 1 % (Trebula & Klement, 2002).

4.3.2. Zlahodnění

Zlahodnění (kondicionování) se vykonává pro snížení zbytkového napětí ve dřevě a vlhkostního spádu, které vzniká při sušení. Vykonává se tehdy, když se vyžaduje vyšší kvalita vysušeného materiálu po dosažení požadované konečné vlhkosti. Optimální podmínky se nastavují tak, aby byla rovnovážná vlhkost vyšší než požadovaná konečná vlhkost. Když teplotu sušení zvýšíme v porovnání s posledním stupněm sušení, zvýší se tím efekt zlahodnění. Čas zlahodnění závisí na rozměrech, druhu dřeviny, velikosti vnitřního napětí, zvláštnosti sušárny a požadované kvality. Pokud se čas zlahodnění nežádoucně prodlouží, může dojít k reverznímu zkornatění. Po dokončení zlahodnění se dřevo může několik hodin nechat v sušárně při parametrech posledního stupně sušení (Trebula & Klement, 2002).



Obrázek 4 Rozdělení vlhkosti na příčném řezu dřeva

Zdroj: (Trebula & Klement, 2002)

1 - vlhkost řeziva v %, 2 - tloušťka řeziva v mm, 3 - sušení, 4 - zlahodnění, 5 - vlhkostní spád po zlahodnění, 6 - vlhkostní spád po sušení

Na obrázku je příklad stavu před a po zlahodnění 70 mm tlusté fošny. Po sušení $t_s = 70$ °C, $U = 2,4$, $\Delta t = 27$ °C, $w_r = 3,0$ %, je vnitřní vlhkost dřeva 11 % a ve vnějších vrstvách 5,5 %. Po zlahodnění o parametrech $\tau = 24$ hodin, $t_s = 60$ °C, $U = 1,8$, $\Delta t = 21$ °C, $w_r = 4,2$ % je vnitřní vlhkost dřeva 10,2 % a v blízkosti povrchu 6,5 %. Zlahodněním se dosáhla průměrná vlhkost 8 % s odchylkou $\pm 1,85$ % (Trebula & Klement, 2002).

4.4.Ochlazení

Když jsme po konečném ošetření dřevo vyvezli ven ze sušárny, okolní studený vzduch prochází mezi vrstvami řeziva v hraních. Ohřívá se a prudce snižuje svojí relativní vlhkost a způsobuje rychlé sušení povrchových vrstev dřeva a tím i vznik povrchových trhlin. Po vlastním sušení anebo po konečném ošetření se dřevo rychle ochlazuje v sušárně až na požadovaný teplotní rozdíl. Při požadavkách na vyšší kvalitu se psychrometrický rozdíl reguluje (Trebula & Klement, 2002).

5. Sušárny

5.1.Komorové sušení

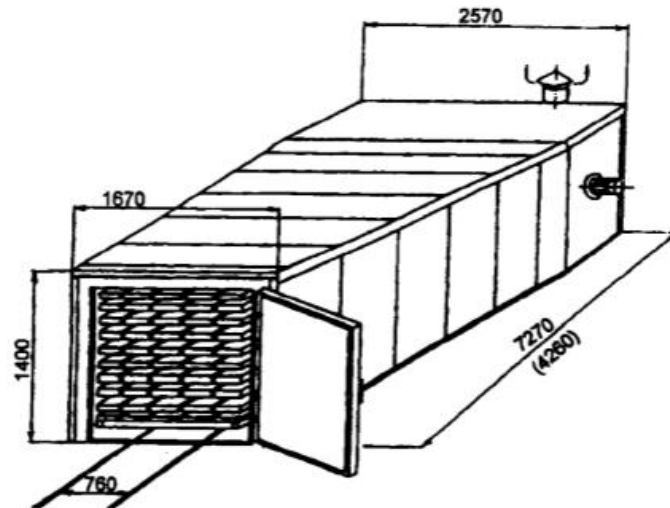
Do komorové sušárny se naveze určité množství materiálu a po ukončení sušení se vyveze. Vlastní sušení je zabezpečeno uložením řeziva v hraních a upravované prostředí na požadovanou vlhkost a teplotu, která prochází přes řezivo, dodává mu teplo a zároveň odebírá odpařenou vodu. Cirkulaci vzduchu zabezpečují ventilátory, které jsou umístěny v mezistropu nebo ve stěně komory. Ohřev sušícího prostředí vykonávají výměníky tepla umístěné za ventilátory. Úprava vlhkosti vzduchu se vykonává vlhčením nebo jeho výměnou za čerství vzduch. Rychlost proudění vzduchu v hraních je 2,5 - 3 m/s. Nejvhodnější délka sušárny je 6 m (Trebula T. , 1994).

5.1.1. Nízkokapacitní sušárny

Výhody: pružné dopravní uspořádání umožňuje více zakázek, mohou se sušit rozdílné druhy dřevin a tloušťky, krátký čas zavážení a vyprazdňování, menší riziko při chybě obsluhy, malý sklad pro vysušený materiál, kvalita,

možnost konečného ošetření, možnost 1 - 3 směnové dopravy, možnost sušit až na 7 % vlhkost

Nevýhody: větší spotřeba místa, větší spotřeba pracovního času na obsluhu a kontrolu, špatně se zařazuje do plynulé výroby, nízká výkonnost, celkově horší tepelná hospodárnost, objem komor je menší, složitější regulace (Trebula & Klement, 2002)



Obrázek 5 Malá sušárna řeziva

Zdroj: (Trebula & Klement, 2002)

5.1.2. Vysokokapacitní sušárny

Výhody: menší spotřeba místa na základovou plochu, náklady, lehké zavážení vysokozdvizným vozíkem, celkově lepší hospodárnost, velký roční výkon a možnost sušit různé dřeviny, tloušťky s konečným ošetřením

Nevýhody: horší plnění termínů při zakázkách, delší časy zavážení a vyprazdňování, větší sklady pro vysušený materiál, špatně se zařazuje do plynulé výroby, větší riziko chyby obsluhy, větší nerovnoměrnost sušení, celkově horší tepelná hospodárnost (Trebula & Klement, 2002)

5.2. Kontinuální (tunelové) sušení

Sušárna má dvoje navzájem proti sobě umístěné dveře. Vlhký materiál se posouvá vhodným transportním zařízením do sušárny, v sušárně se přemísťuje v daném směru a usušený materiál se ze sušárny vyváží. Tento proces je nepřetržitý anebo je v určitých časových intervalech. Sušárna je až 100 m dlouhá a může být použita všude, kde se mají sušit velké množství řeziva stejného druhu, tloušťky a přibližně stejné počáteční vlhkosti (Glijer, 1995).

Jsou dva možné principy:

a) Sušící tunel je po délce rozdělený na jednotlivé zóny a ty jsou regulované konstantním sušícím prostředím. Hráně postupují po délce na vyznačené zóny s konstantním prostředím (v taktech), postupně do ostřejších sušících podmínek, přičemž se vyžaduje přesný výpočet celkového času sušení a z toho vyplývající čas taktu. Z taktového času a délky sušárny dostaneme celkový čas sušení (Trebula & Klement, 2002).

Tento postup umožňuje lepší ovládání průběhu sušení než následující.

b) Protiproudový princip. Hráně postupují sušícím tunelem příčně proti proudu sušícího vzduchu. Vzduch, který příčně protéká hráněmi, odebírá vodu ze dřeva, zvyšuje svou vlhkost a zároveň se ochlazuje. Vlhké dřevo je na vstupu do sušárny nejprve omývané vzduchem o nižší teplotě a vysoké relativní vlhkosti vzduchu. S postupujícími hráněmi klesá relativní vlhkost vzduchu, teplota s sušící spád stoupá. Nevýhodou tohoto postupu sušení je těžkost regulace sušícího prostředí (Trebula & Klement, 2002).

Kontinuální sušárny se od komorových liší způsobem dopravy, délkou a principy regulace režimu sušení. V kontinuálních sušárnách se stav vzduchu mění po délce sušení. Cirkulaci vzduchu zabezpečují ventilátory, které jsou umístěny nad mezistropem sušárny. Vlhkost vzduchu se upravuje výměnou nasyceného za čerství vzduch přes nasávací a odvětrávací komíny a vlhčení (Trebula & Klement, 2002).

Výhody: možné připojení přímo na výrobní linku bez nároků a mechanizaci, vysoká roční výkonnost, kontinuální výroba, lepší tepelná hospodárnost, nižší stavební náklady, jednoduchost sušení, jeden směr pohybu materiálu

Nevýhody: musí být k dispozici stejná dřevina a ve stejném objemu, střední kvalita, konečné ošetření není možné u většiny typů vykonat, vhodné jen pro

jehličnaté dřeviny, dodatečné investice na doprání zařízení, vyžaduje třísměnný provoz (Trebula & Klement, 2002)

5.3.Vysokoteplotní sušení

V praxi se rozlišují dva postupy sušení. Používají se zřídka a jen tehdy, když se na vysušený materiál nekladou vyšší kvalitativní požadavky. Suší se hlavně jehličnaté dřeviny do 50 mm tloušťky. V praxi se teplota 100 °C překračuje jen pod BNV.

a) Sušení směsí vzduchu a přehřáté páry

Používá se směs vzduchu - vody a přehřáté páry. Pokud je teplota pod 100 °C, tak jsou parametry regulované stejně jako při klasickém sušení. Po překročení této meze se měření a regulace vypínají. Bez dodatečného vlhčení a při plně otevřených klapkách v komínech se dosáhne velmi nízké rovnovážné vlhkosti a velmi ostrého sušícího spádu. U tenkých jehličnatých dřevin se dosahuje velmi krátké doby sušení. V porovnání se sušením přehřátou parou je kvalita takto vysušeného materiálu nižší, ale časy jsou kratší (Trebula & Klement, 2002).

b) Sušení přehřátou parou.

Přehřátá pára má při stejném tlaku vyšší teplotu než jak je tomu u nasycené páry. Maximální teplota sušení je pro řezivo $t_{s \max} = 130$ °C a teplota mokrého teploměru $t_m = 100$ °C. V procesu sušení se reguluje teplota t_s . Když se neudrží hermetičnost v sušárně, vzduch vniká do sušárny a z toho důvodu $t_m < 100$ °C, tím začíná nekontrolovatelné sušení.

Na začátku ohřevu, když je v sušárně vzduch a řezivo, které má teplotu pod 100 °C, zkondenzovaná pára na povrchu dřeva příznivě ovlivňuje ohřev. Je vyšší nebezpečí vzniku trhlin. Ohřev musí být co nejkratší. Když je dřevo předsušené a hrubé dimenze, na začátku ohřevu se paří popřípadě vlhčí rozprášenou vodou, aby se vzduch ze sušárny vytlačil.

Ve vlastním sušení se dbá na to, aby nevzniknul velký vlhkostní spád, došlo by tím ke vzniku trhlin. Při vysokých teplotách je dřevo plastické a proto by mělo vznikat méně trhlin a též je zvýšený koeficient vodivosti vody.

V prvním úseku se vroucí voda vypařuje z povrchu dřeva. Unikající vodní pára má asi 1 600 krát větší objem než stejné množství kapalné vody a proto se musí

dostatečně dimenzovat klapky na odvod vzduchu, aby v sušárně nevzniknul zvýšený přetlak. Tento úsek probíhá rychle, příznivě a bez větších vlhkostních spádů.

Ve druhém úseku hladina vypařování klesá a zvyšuje se odpor proti prodění páry, v suchých vrstvách povrchu dřeva stoupá teplota. Průměrná vlhkost klesá pod BNV. Rychlost sušení značně klesá, ale i tak je vyšší než u klasického sušení. Klesá také rozdíl mezi přehřátou parou a dřevem.

Ve třetím úseku se vysouší povrchové a vnitřní vrstvy na odpovídající rovnovážnou vlhkost teplotním podmínkám. Vzhledem na velký vlhkostní spád se 1 - 2 hod. dělá kondicionování. Bez změny teploty v sušárně mezi 98 - 100 °C klesne teplota řeziva na 105 °C. Klapky jsou zavřené a poté následuje ochlazení.

Relativně rychlé sušení tímto způsobem v porovnání s předešlým vede k rovnoměrnému rozdělení vlhkosti na příčném řezu a tím i k lepším výsledkům (Trebula & Klement, 2002).

Výhody: až o 60 - 40 % kratší čas sušení, jednoduché ovládání průběhu sušení pomocí regulátoru teploty řeziva, nižší spotřeba el. energie, snižuje se navlhavost, žádné povrchové trhliny, zvyšuje se kapacita sušárny

Nevýhody: jen pro dřeviny s menšími rozměry a dobrou propustností, povrchové zbarvení, časté vnitřní trhliny, velké namáhání sušeného materiálu v důsledku vysoké teploty, vyžaduje se velký tepelný příkon sušárny v krátkém čase ohřevu, jsou potřebné vyšší rychlosti proudění vzduchu, náročnost na těsnost sušárně, korozivní účinky (Trebula & Klement, 2002)

5.4. Speciální způsoby sušení

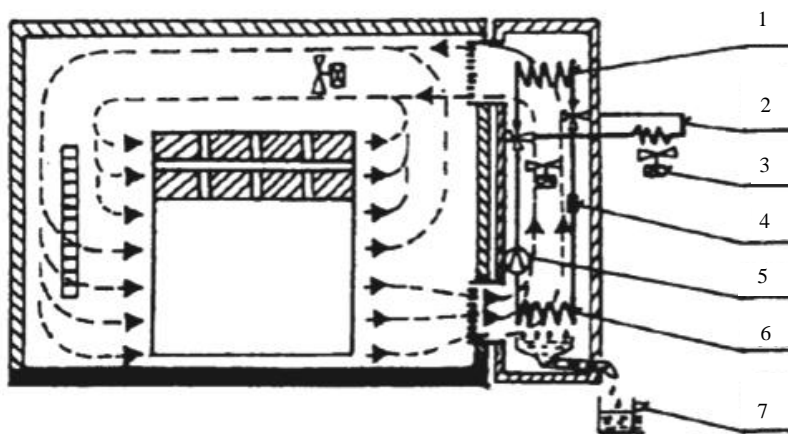
5.4.1. Kondenzační sušení

Kondenzační sušení probíhá podobně jako konvekční teplovzdušné sušení při atmosférickém tlaku. Není vlhčení vzduchu a jeho odvod je komíny. V praxi rozeznáváme dva zásadní technické postupy kondenzačního sušení:

a) Princip částečného odvlhčení proudícího vzduchu

Sušící vzduch nepřetržitě cirkuluje pracovním prostorem sušárny a v kondenzačním zařízení s tepelným čerpadlem. Vlhký vzduch ze sušárny přechází výparníkem, kde dochází k jeho sušení ochlazením a odvodem zkondenzované vody. Z celkového

cirkulujícího množství vzduchu v sušárně je odvlhčená jen jeho část, asi 30 - 40 %. Ochlazený a vysušený vzduch je dále vedený přes hlavní kondenzátor, kde se ohřívá a vrací zpět do sušárny. V té je instalovaný ohřivač s přívodem primární energie pro počáteční úsek procesu sušení, kde se upravuje na pracovní teplotu. U sušárny je nainstalován přídatný kondenzátor s ventilátorem chlazeného vzduchu, pro případný odvod přebytečného tepla. Toto uspořádání umožňuje získat zpět latentní teplo a odvést ho v podobě aktivního tepla do sušícího prostředí (Trebula & Klement, 2002).



Obrázek 6 Kondenzační sušárna s tepelným čerpadlem a s částečným odvlhčením vzduchu

Zdroj: (Trebula & Klement, 2002)

1 - hlavní kondenzátor, 2 - přídatný kondenzátor, 3 - ventilátor, 4 - kompresor, 5 - škrťací ventil,
6 - výparník, 7 - odvod kondenzátu

Teploty jsou 25 - 45 °C, výjimečně 55 - 70 °C. Teplota v sušárně je nízká a sušící podmínky jsou jemné, takže čas sušení je dlouhý, spotřeba el. energie je vysoká a kvalita vysoká. Tato vysoušení jsou vhodná pro drahé, citlivé, tvrdé dřeviny větších rozměrů. Hospodárnost je nízká a dosažení nízké konečné vlhkosti je teoreticky dosažitelné. Příprava a sušení, měření a regulace t_s , t_m , w je obdobné jako u komorového sušení. Naopak v důsledku uvedených parametrů odpadá zlahodnění a ochlazování (Trebula & Klement, 2002).

b) Princip úplného odvlhčení proudícího vzduchu

Celý proud vzduchu se po protečení přes hráš v kondenzátoru odvlhčí.

Významné faktory pro hospodárnost kondenzačního sušení:

- energetická situace daného místa,

- požadovaná konečná vlhkost,
- sušené dřeviny a jejich tloušťky,
- požadovaný daný výkon.

Ekonomický výpočet hovoří pro zavedení kondenzačního sušení v jednotlivých provozech, kde:

- je jen el. energie,
- suší se tvrdé dřeviny velkých rozměrů a nízkými teplotami,
- není požadovaná nízká konečná vlhkost,
- jsou požadované nízké denní výkony.

Výhody: vhodné pro tvrdé, těžko se sušící listnaté a cenné dřeviny, šetrné sušení, žádné chyby sušení, vysoká flexibilita sušení různých druhů dřevin s rozdílnou počáteční vlhkostí a tloušťkou současně, snížení ztrát na řezivu až o 3 %, žádné emisní zatížení, jednoduché zpětné získání tepla, jednoduchá obsluha a kontrola

Nevýhody: až 3 krát delší časy sušení a tím i vyšší náklady než u konvekčního sušení, nedoporučuje se pro jehličnaté a lehké listnaté dřeviny z důvodu možné změny barvy, velké nebezpečí je u dřevin náchylných na modráni (např. borovice), odvod kondenzátoru (Trebula & Klement, 2002)

5.4.2. Vakuové sušení

Použití rozsahu tlaku - vakua má vliv na náklady. Čím je nižší pracovní tlak, tím nákladnější se tvoří konvektivní přenos tepla s velkým počtem nízkotlakových ventilátorů. Jsou zvýšené požadavky na těsnost v sušícím prostředí a vývěvu. Čím delší čas v provozu, tím se zvětšuje opotřebení. Pokud chce provozovatel sušit listnaté dřeviny rychle a kvalitně musí s tím počítat. Když použijeme v čisté přehřáté páře tlak 20 kPa, tak víme, že této hodnotě odpovídá tlak nasycení 60 °C. V komorových sušárnách je teplota v každém případě nad touto hodnotou, protože jen nenasycená pára může přijímat vhodné páry ze dřeva. Při 20 kPa a více můžeme vysoušet jen takové dřeviny, které v čerstvém stavu vydrží teplotu 65 °C a více. To se většinou netýká listnatých dřevin. Hraniční hodnotu teploty danou pracovním tlakem je možné snížit v parovzdušné směsi, ale přitom se musí počítat s rizikem zbarvení. Kromě toho bychom se měli vyhnout tomu, když sušíme při vysokém tlaku, aby se kritický přenos

vody při tvrdých dřevinách nežádoucně nezpomalil (Trebula, Joščák, & Klement, 1994).

Způsob, kterým je teplo dodávané k materiálu představují vakuové procesy sušení. Podle způsobu ohřevu dřeva, případně výšky tlaku po dobu sušícího procesu se rozlišují na tři následující postupy:

a) Kontinuální vakuové sušení při konstantním tlaku, se stálým ohřevem dřeva vyhřívacími deskami, sáláním, vysokou frekvencí nebo mikrovlnami.

b) Kontinuální vakuové sušení v přehřáté páře, nebo v parovzdušné směsi při sníženém tlaku, to znamená stálý přenos tepla a hmoty přes rychle cirkulující sušící médium.

c) Diskontinuální sušení se střídáním ohřevu a sušících fází se změněnými tlakovými podmínkami, to znamená cirkulujícím vlhkým vzduchem při atmosférickém tlaku a vypařováním vody po dobu vakuové periody (Trebula, Joščák, & Klement, 1994).

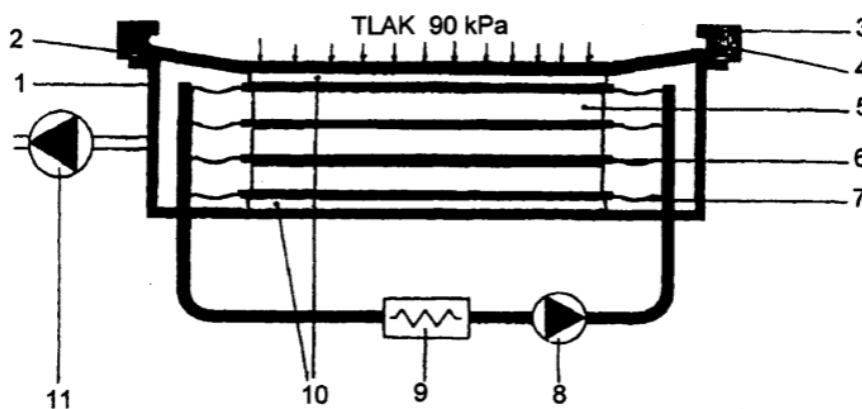
Tabulka 3 Klasifikační schéma vakuových způsobů sušení

Zdroj: (Ressel, 1994).

<i>Kontinuální vakuové procesy</i>		<i>Diskontinuální vakuové procesy</i>
Probíhající hlavně za konstantních tlakových podmínek po dobu celého procesu		Střídavé tlakové podmínky (atmosférický tlak - vakuum) cyklické přerušování sušení
Téměř čistá parní atmosféra (malé množství zbytkového vzduchu)	Téměř čistá přehřátá pára, nebo výpary vody v atmosféře (částečné vakuum)	Vlhký vzduch (normální tlak) - nenasycené pára z atmosféry a zbytkový vzduch (vakuum)
<i>Sušárna s deskami</i> Konduktivní přenos tepla (kontaktní ohřev)	<i>Sušárna bez desek</i> Konvektivní přenos tepla (cirkulující sušící médium, nucená cirkulace), sálání, vysoká frekvence, mikrovlny a kombinace těchto metod	

5.4.2.1. Kontinuální vakuové procesy

K vypařování vody je nutné teplo, které se materiálu dodává vyhříváním deskami (kontaktní ohřev, tepelná vodivost). Desky nahrazují prokladové latě, které jsou vyhřívány cirkulující vodou nebo elektricky. Teplota desek je regulována v závislosti na dřevině, její teploty a vlhkosti. Sušení v takovém zařízení následuje po ohřevu po vytvoření vakua a to jen na začátku sušení v podstatě kontinuálně. Vypařená voda se může vysát ve formě páry nebo nechat zkondenzovat na chladících deskách nebo na stěnách sušárny, odkud je poté odvedená. V sušárně je parovzdušná směs. Teplota dřeva během procesu stále stoupá. Nad BNV se nejdříve přiblíží teplotě varu vody a zůstane na konstantní hladině, pod BNV se blíží pomalu k teplotě vyhřívání desek. Vlhkostní a teplotní gradient stejně jako gradient tlaku vodní páry na příčném řezu dřeva jsou protikladné a vyžadují dokonalé kontrolování řízení procesu a tím i omezení vzniku chyb. Kapacita sušárny je malá a nepřekračuje 12m^3 . Používají se především na malé objemy z důvodu velikosti vyhřívání desek, jejich zdlouhavému ukládání, napojování hadic a poruchovosti. Proto se tyto sušárny používají ojediněle (Trebula, Joščák, & Klement, 1994).



Obrázek 7 Příčný řez vakuovou sušárnou s kontaktním ohřevem

Zdroj: (Trebula, Joščák, & Klement, 1994)

- 1 - sušárna, 2 - pružná pogumované plachta, 3 - rám, 4 - těsnění, 5 - řezivo, 6 - vyhřívací desky, 7 - pružné pogumované hadice, 8 - horkovodní čerpadlo, 9 - ohřev, 10 - tepelná izolace, 11 - vývěva.

U této sušárny tvoří ručně odklopný kryt gumová membrána, která po dobu vakuování přitlačí horní vyhřívané desky a hráň s řezivem odpovídající tlakovou rozdílností (mezi okolím a vakuovou sušárno). Toto zařízení zlepšuje kontakt mezi dřevem a vyhřívanými deskami a tím i přenos tepla do dřeva. Výsledkem jsou kratší časy sušení a snížení případné deformace dřeva (Trebula & Dekrét, 1987).

Výhody: velmi krátký čas sušení, jednoduché, plynulé a šetrné sušení, relativně jednoduchá regulace, velmi dobrá kvalita, vysoká kapacita, nízká spotřeba tepla a el. energie, sušárna zabírá malý prostor, možnost využití netradičních zdrojů tepla, snížení oxidace, nízká hlučnost a prašnost

Nevýhody: velký rozdíl teplot uvnitř dřeva na začátku sušení, rozdíl teplot na vstupu a výstupu desek, řezivo musí mít stejnou tloušťku, nedá se vykonat konečné ošetření, velký vlhkostní spád, velká hmotnost a vlhkost desek vyžaduje obsluhu nebo mechanizaci, dlouhý čas ukládání a vyprazdňování, zavážení a vyvážení je nepohodlné, stěny sušárny oxidují, náročná údržba a oprava, kondenzát, vysoké provozní náklady (Trebula, Joščák, & Klement, 1994)

5.4.2.2. Diskontinuální (cyklické) procesy

Diskontinuálním vakuovým sušením se vyhýbáme těžko manipulovatelným vyhřívacím deskám. Po dobu fáze normálního tlaku je ve vakuové sušárně řezivo proložené prokladovými latěmi. Cirkuluje vlhký vzduch konvektivně zahřátý na předem určenou teplotu. Poté následuje fáze vakuování (tlak cca 40 kPa) bez ohřevu a cirkulace vzduchu. Vypařováním vody po dobu vakua je ze dřeva odevzdané teplo, až podtlak dosáhne odpovídající teplotě vypařování. Vlhkostní a teplotní gradient na příčném řezu řeziva je v tomto úseku vyrovnaný a vyžaduje rychlé a šetrné sušení. Pokud je vlhkost dřeva nad BNV, věnujeme po dobu ohřevu zvýšenou pozornost řízení sušícího prostředí. Příliš velký přívod tepla při suchém sušícím prostředí způsobuje vznik chyb, stejně jako u konvekčního teplovzdušného komorového sušení. Je zde nebezpečí zbarvení řeziva z důvodu dehydratace složek dřeva, zejména celulózy. Voda je částečně odstraňována vývěvou a kondenzuje na chladicích deskách nebo na vnitřním plášti kotle, do kterého je napuštěná studená voda. Cyklus ohřev - sušení se opakuje dokud dřevo nedosáhne konečné požadované vlhkosti. Výhoda je v tvorbě příznivého teplotního gradientu pro tok vody. Teplotu povrchu dřeva snižuje plošné vypařování a proto je přenos vody z teplejších míst ve středu dřeva k povrchu. Spotřeba tepla

je nepříznivě ovlivňovaná střídáním fází ohřevu cirkulující vzduchem při atmosférickém tlaku a vakua (Trebula, Joščák, & Klement, 1994).

Výhody: velmi krátký čas sušení, možnost sušení tvrdých a širších listnatých dřevin, vysoká kapacita sušárny, flexibilita sušení, možnost konečného ošetření, zůstává přirozená barva, vysoká kvalita, rychlé uvedení do provozu, jednodušší obsluha, rychlejší manipulace s materiálem, zabírá malý prostor, stěny sušárny neoxidují, pokud je vyhříváný plášť sušárny, využití netradičních zdrojů tepla

Nevýhody: delší čas sušení než u kontinuálně vakuového sušení, možnost chyb zejména po dobu ohřevu, vhodné do menších provozů, vyšší spotřeba tepla a el. energie, náročnější údržba a oprava, kondenzát, pro lepší využití prostoru v sušárně se materiál doporučuje omítat (Trebula, Joščák, & Klement, 1994)

Jedním z nejstarších způsobů vakuového sušení je diskontinuální vakuové sušení s deskami. Skládá se ze tří etap:

1. Ohřev dřeva deskami vyhříványými teplou vodou. Ohřev trvá dokud střed dřeva nedosáhne předem stanovenou teplotu, která je obvykle nižší o 15 - 30 °C, než teplota v deskách.
2. Fáze ochlazování, která se docílí čerpáním studené vody do desek a trvá dokud voda u výstupu z desek nedosáhne 40 - 50 °C. Po dosažení této podmínky začíná další fáze.
3. Vakuování - sušení (vypařování vody).

Tyto sušárny se v praxi neujali z důvodu zvýšené spotřeby tepla, náročné manipulaci a pod. (Trebula & Klement, 2002).

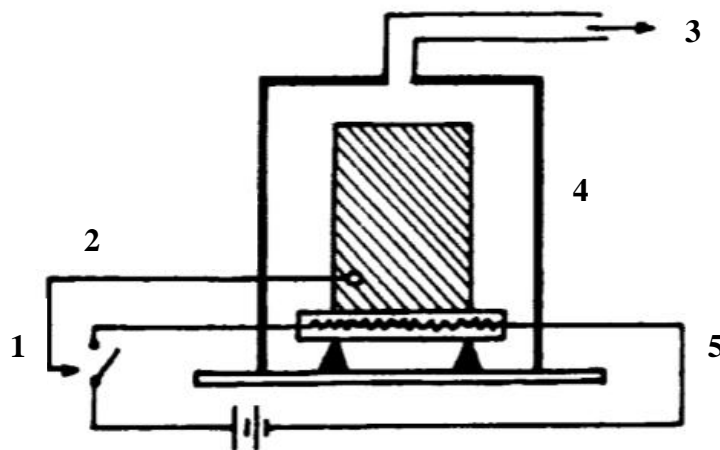
5.4.3. Sublimační sušení

Používá se u sušení při nízkých teplotách, které napomáhá zachování technologických vlastností materiálu na původních hodnotách. Látka prochází přímo z pevného do plynného skupenství. Při atmosférickém tlaku je sublimace pomalá a málo intenzivní. Vakuum sublimaci výrazně zlepšuje. Materiál se nejdříve mrazí na -30 °C a vytvoří se vakuum 0,27 - 26,6 kPa. Předpokladem pro tento způsob je, aby se sušenému materiálu dodalo potřebné skupenství a výparné teplo. Na 1 kg ledu

alespoň 2 500 kJ, přičemž se musí dodržet teplota materiálu $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při tomto postupu se voda nepohybuje v kapalném skupenství. Při sušení je nadměrné sesychání. Výsledky si protičeří.

Výhody: velmi dobrá kvalita

Nevýhody: možnost vysokého objemového seschnutí, velmi pomalé sušení, snížení pevnosti v důsledku sušícího napětí, vyšší náklady na investice a provoz (Trebula & Klement, 2002)



Obrázek 8 Schematické znázornění sublimačního sušení

Zdroj: (Trebula & Klement, 2002)

1 - regulace teploty, 2 - termočlánek, 3 - vývěva, 4 - vysoušený materiál, 5 - ohřívací deska

5.4.4. Kontaktní sušení

Způsob sušení při kterém je materiál mezi vyhřívanými deskami lisu a je obvykle sušený pod stálým tlakem. Prostup tepla se uskutečňuje kondukcí a je velmi rychlý.

Podmínky sušení:

- tlak závisí na dřevině a její tloušťky. Pro jehličnaté $p = 0,2 - 1,2\text{ MPa}$ a pro listnaté $p = 0,4 - 2,5\text{ MPa}$,
- teplota $160 - 170\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při teplotě nad $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ se voda ze dřeva vypařuje:
- po dobu uzavření lisu přes boky a čela dřeva,
- po dobu otevření lisu povrchem dřeva,
- přes profilované nebo děrované vyhřívací desky se může voda vypařovat i při uzavření lisu,

- přes vložená síta mezi deskami lisu a sušeným materiálem, se voda průběžně vypařuje při uzavření lisu (Trebula & Klement, 2002).

Sušení je ukončené, když teplota ve středu řeziva dosáhne teplotu lisovacích desek.

Vysoký tlak páry uvnitř dřeva a též čelní trhliny jsou nejméně způsobovány u málo propustných dřevin. Vyrovnat tlak ve dřevě můžeme prudkým snížením lisovacího tlaku nebo otevřením lisu. Vhodné jsou jehličnaté dřeviny. Z listnatých dřevin je to dub, buk, habr, jasan, topol, javor a bříza. Dřeviny, které osahují jádro je potřebné nejdříve předsušit

na 30 % (Trebula & Klement, 2002).

Kontaktním sušením dosáhneme:

- a) zkrácení času sušení,
- b) dřevo získá teplejší odstín, zvýrazní se letokruhy,
- c) na dřevo má stabilizační účinek, to znamená že má dřevo menší tendenci bobtnat a sesychat při změně parametrů vzduchu,
- d) snížení hygroskopicity,
- e) po sušení je dřevo rovnější,
- f) zvyšuje se hustota dřeva, v závislosti na tlaku o 6 - 12 %,
- g) stoupne pevnost dřeva až o 10 %,
- h) u většiny dřevin je potřeba vytrít jádrovou a bělovou část,
- i) dřevo si zachovává přibližně stejné vlastnosti při opracování, lepení a též pevnost v porovnání se dřevem vysušeným teplovzdušným sušením,
- j) materiál je bez trhlín.

Výhody: krátký čas sušení, relativně malá spotřeba tepla, hladký povrch, menší sesychání a deformace

Nevýhody: vysoké investiční a provozní náklady, nerovnoměrné rozdělení hustoty na přířezu, tlakové seschnutí, tvorba trhlín účinkem vysoké teploty a tlaku, změna barvy, vhodné jen pro některé dřeviny, buk s nepravým jádrem musí být předsušený (Trebula & Klement, 2002)

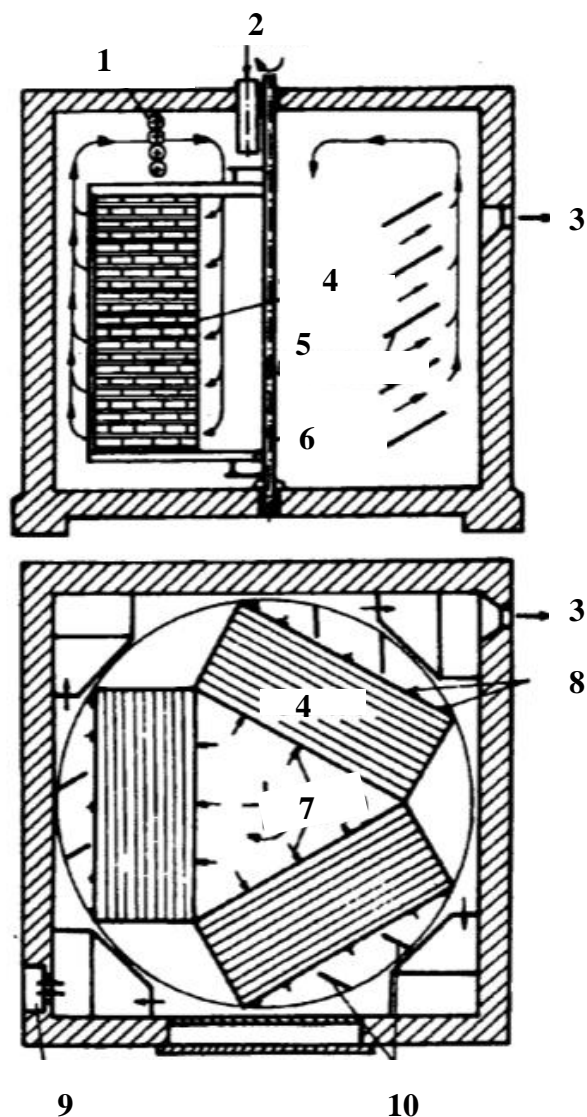
5.4.5. Rotační sušení

Rotační sušárna je založená na principu rotačního efektu. Voda v kapalném stavu se může odstranit přes otvory membrán jen při vysokém vnitřním tlaku, který se vytváří odstředivým zrychlením, který nepřevyšuje 12 g.

Rotační sušení je kombinovaný proces konvekčně-odstředivého sušení, při kterém se přenos tepla a vody mezi materiálem a prostředím uskutečňuje konvekcí a pohybem volné vody intenzivně odstředivým efektem. Stupeň odstředivého efektu na dobu sušení řeziva závisí na hodnotě odstředivého efektu, počáteční vlhkosti, druhu dřeviny a její tloušťky.

Počet obrátek točny s řezivem za minutu nepřevyšuje 60. Hřídel je poháněná elektromotorem o příkonu 3 - 5 kW. Při otáčení točny s řezivem se vzduch pohybuje vlivem odstředivých sil v radiálním směru, mimo točnu proudí spirálovitě a pomocí usměrňovacích lopatek se dostává do horní části, kde proudí přes vyhřívací tělesa a vrací se zpět do střední části. Při otáčení vznikají pulzující tlakové kmity. V průmyslu se nenašlo širší uplatnění (Janik, 1965).

Výhody: vysoká kvalita, rovnoměrnost sušení, krátký čas sušení, hospodárnost
Nevýhody: malý užitekový objem, velká konstrukce (Janik, 1965).



Obrázek 9 Spirálová odstředivka

Zdroj: (Janík, 1965)

1 - vyhřívací tělesa, 2 - čerstvý vzduch, 3 - odvod vzduchu, 4 - hráň, 5 - deflektor, 6 - točna, 7 - směr vzduchu, 8 - ochrana proti odstředivým silám, 9 - psychrometr, 10 - větrná křídla

5.4.6. Indukční sušení

Mezi vrstvami řeziva jsou uloženy feromagnetické sítě z měkké ocele, které jsou umístěny v elektromagnetickém poli. Uvnitř sušárny je solenoid (podlouhlá cívka). Feromagnetické sítě se nahřívají indukčním proudem. Ty kontaktním způsobem přenášejí teplo vysoušenému materiálu a konvekčním způsobem od cirkulujícího vzduchu. Teplota dřeva je vyšší, než teplota okolního prostředí, důsledkem toho

se ve dřevě vytváří kladný teplotní spád, který intenzifikuje proces sušení. Kvalita řeziva je podprůměrná kvůli nerovnoměrnosti sušení, vzniká velké vnitřní napětí a z důvodu přehřátí dochází ke spálení některých míst. Čas sušení je 1,5 - 2 - krát kratší než u klasického sušení. Spotřeba tepla je stejná jako u komorového dielektrického sušení. Náklady a sušení jsou 2 - krát větší než u klasického sušení (Trebula & Klement, 2002).

5.4.7. Dielektrické sušení

5.4.7.1. Vysokofrekvenční sušení (vf)

Sušením vysokofrekvenčním proudem lze dobu sušení zkrátit až o třetinu normální doby sušení. Následkem odpařování vody se na povrchu dřevo ochlazuje, jinak je vysoušení stejnoměrné. U normálního vysoušení se dřevo ohřívá zvenku dovnitř, ale u vysokofrekvenčního je to přesně naopak a to zevnitř ven (Lysý & Jírů, 1954).

Ohřev materiálu je způsobený změnou pohybu atomů a molekul materiálu vlivem vf elektromagnetického pole. Příčinou vzniku tepla je kmitavý pohyb částic, vyvolaný silným působením pole doprovázený teplem. Teplo vzniká uvnitř materiálu pohlcováním elektromagnetické energie molekulami materiálu. Následkem toho je opačný tok tepla. Tento děj neovlivňuje tepelná vodivost dřeva. Při intenzivním ohřevu vzniká uvnitř materiálu přetlak vodní páry a to při teplotách značně nižších než 100 °C. Vyrovnání přetlaku závisí na intenzitě ohřevu a na pórovitosti materiálu, který také podmiňuje vznik jeho gradientu. Přenos vody vlivem tlakového gradientu se koná nejen molekulární difúzí, ale také pomocí molárního pohybu. Vf sušení má uplatnění především u sušení masivních materiálů. Povrchové vrstvy jsou tlakově namáhané a je nebezpečí vzniku trhlin (Trebula & Klement, 2002; Lysý & Jírů, 1954).

Výhody: dá se dosáhnout dobré kvality, krátký čas sušení, flexibilní sušení, rovnoměrný ohřev a sušení, možnost kontinuálního sušení, pohotovost výroby, lehká ovladatelnost, malé rozměry sušárny, omezení předzásob, vhodné pro jehličnaté dřeviny, buk, habr a ořech

Nevýhody: musí být kvalifikovaná obsluha a údržba, velká spotřeba el. energie, vysoké investiční a provozní náklady, možnost nerovnoměrného ohřevu (Trebula & Klement, 2002)

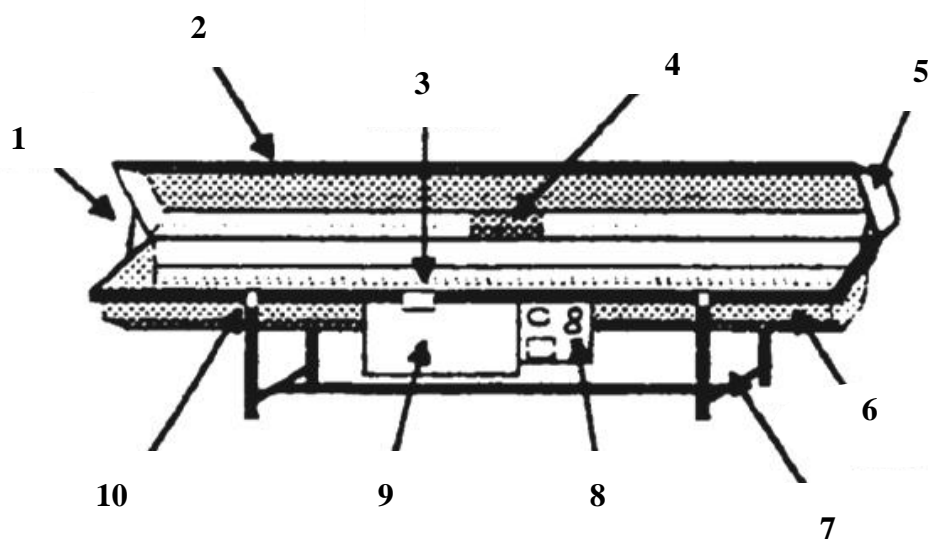
5.4.7.2. Mikrovlnné sušení (vlf)

Mikrovlnný ohřev je zvláštní druh dielektrického ohřevu a uskutečňuje se v pásmu frekvence 300 MHz - 300 GHz. V praxi se používají frekvence 814 MHz, 1 250 MHz a 2 375 MHz. Zdrojem energie jsou magnetrony. Teplo vzniká v dielektriku důsledkem polarizace materiálu v uzavřených prostorách dutinových rezonátorů nebo vlnovodech. Vlnová délka mikrovln je 1 - 1000 mm. Proces sušení je kontinuální, řezivo je uloženo v blocích bez prokladových latí. Energie elektromagnetických vln se do sušicího tunelu dostává vlnovodem, které jsou naplňované magnetrony. Dřevo se ohřívá rovnoměrně (Klement, 1995).

Sušárna se skládá ze třech zón: ohřívací, sušicí a chladicí. Rentabilní kapacita pro mikrovlnné sušení je cca 5 000 m³/r (0,7 m³/h). Mikrovlnný zdroj má příkon 125 kW. Rychlost dopravníku je 1 m/h.

Výhody: snížený počet trhlin, velmi krátký čas sušení, vhodnější pro větší rozměry, zařízení je jednoduché, nenáročná údržba, jednoduchá manipulace s materiálem, zabírá malý prostor, možnost připojení na el. síť 220 V

Nevýhody: nehomogenní ohřev dřeva po délce, vytéká pryskyřice, vysoká spotřeba el. energie (Trebula & Klement, 2002)



Obrázek 10 Mikrovlnná sušárna

Zdroj: (Trebula & Klement, 2002)

1 - plynové vzpěry, 2 - elektromagnetické těsnění, 3 - koncový vypínač, 4 - ventilátor odsávání vodních par, 5 - horní odklopná část, 6 - spodní pevná část, 7 - nosný rám, 8 - ovládací panel, 9 - blok elektroniky, 10 - bezpečnostní zámky

5.4.8. Infračervené sušení

Sušení pomocí infračerveného záření, kterým vzniká teplo. Záření, které dopadá na dřevo je z části odražené, pohlcené a část může být propustná. Absorpce závisí na vlnové délce z daného pásma. Používá se u vysoušení textilu, papíru, dých, nátěrů a laků. Na vysoušení vlhkého dřeva se toto vysoušení nehodí. Absorpce záření sice stoupá s zvyšující se vlhkostí do BNV, prostup záření přes obsahující vodu ve dřevě je dále brzděný a proniká jen do hloubky 1 - 7 mm. Důsledkem je strmý teplotní spád mezi jednotlivými povrchovými vrstvami dřeva, a tím možnost vzniku povrchových trhlin. Spotřeba el. energie na odpaření 1 kg vody je poměrně vysoká (1,6 - 5,2 kWh) (Trebula & Klement, 2002; Lysý & Jirů, 1954).

5.4.9. Sušení v kapalinách

Tento postup se používá ve spojitosti s ochranou dřeva.

5.4.9.1. Sušení v hydrofobních kapalinách při $t > 100\text{ }^{\circ}\text{C}$

Používají se oleje, parafín a Woodova slitina. Voda se odpařuje ve formě páry, kdy tlak páry je větší než tlak vzduchu a tlak okolní kapaliny. Uvnitř dřeva se vytvoří v důsledku varu vody zvýšený tlak, účinkem kterého pára přechází do okolního prostředí. Při silném rozptylu z plynu případně parních bublin dochází k extrémnímu tvoření páry při sušení v oleji. Toto sušení se používá pro sušení těžkých listnatých dřevin. Náklady jsou o 25 - 50 % vyšší než u klasického sušení. Čas sušení tvoří asi 30 - 50 % času sušení s přehřátou parou. Olej do dřeva pronikne 1 - 5 mm (Trebula & Klement, 2002).

5.4.9.2. Sušení v hydrofobních kapalinách při $t < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$

Sušící kapalinou je třeba tetrachlorethan. Princip sušení je v tom, že teplota varu směsi je nižší než bod varu složek směsi. Např. směs z 84 dílů tetrachlorethanu a 16 dílů vody má teplotu varu od $87\text{ }^{\circ}\text{C}$. V takové směsi je poté možné sušení v rozsahu $87 - 100\text{ }^{\circ}\text{C}$. V průběhu sušení se vzniklá směs voda-tetra-pára kontinuálně odvádí a ve vakuu se destilací rozkládá. Čistý tetrachlorethan je znovu použitelný. Postup sušení je spojený s impregnací. Rychlost sušení je 2 - 3 krát vyšší než u sušení v přehřáté páře (Trebula & Klement, 2002).

5.4.9.3. Sušení v hydrofilních kapalinách

Postup sušení spočívá v extrakci vody ze dřeva pomocí vodní směsi alkoholu, acetonu nebo éteru. Na základě koncentračního spádu mezi rozpouštědlem a vodou proniká odstraněná voda ze dřeva. Dodatečně jsou rozpuštěné extrakční látky jako je pryskyřice a tanin. Sušení je velmi šetrné a v relativně krátkém čase při zbytku 2 % rozpouštědla ve dřevě (Trebula & Klement, 2002).

5.4.9.4. Sušení v parách organických rozpouštědel

Jako rozpouštědla se používají např. xylen, toluen, tetrachlorethan. Tyto rozpouštědla nejsou vodou ředitelné. Dřevo se rychle ohřeje v čisté přehřáté páře. Rozpouštědlo se napustí a nahřeje nad bod varu. Pára kondenzuje na chladném dřevě a tím přenáší teplo. Ventilátorem se zabezpečuje rovnoměrnost rozložení organických par. Při přímém působení organické kapaliny ventilátor odpadá. Voda se odpařuje ze dřeva. Směs vodní páry a par organických kapalin je odstraňovaná a oddělována mimo kotle např. kondenzátorem. Průběh sušení je možné sledovat podle množství

zkondenzované vody. Používáním některých látek je jako doprovodný jev impregnace dřeva (Trebula & Klement, 2002).

5.4.10. Kombinované sušení

Všechny výše popsané způsoby mají svoje výhody a nevýhody. Kombinované sušení dřeva je sušení, při kterém se snížení vlhkosti dřeva na požadovanou hodnotu dosáhne vhodnou kombinací různých způsobů sušení, např.:

- předsoušení a teplovzdušného,
- přirozeného a teplovzdušného,
- kondenzačního a teplovzdušného,
- předsoušení a vysokoteplotního,
- teplovzdušného a vakuového a pod (Houška, Valchář, & Viktorin, 1984).

Při celkovém posouzení výhodnost kombinovaného sušení používáme technologicky-technicko-ekonomická kritéria, pomocí kterých zvažujeme výhody a nevýhody jednotlivých způsobů sušení. Používaná kritéria jsou: kvalita vysušeného materiálu, spotřeba tepla a el. energie, čas sušení, výkon sušárny, ztráty na řezivu, pravidelnost sušení, flexibilita sušení, namáhavost práce, zásoby řeziva, pracovní síly, mechanizační prostředky, doprava, údržba, mzdy a plocha. Z uvedených kritérií vypočítáme celkové náklady vysušeného řeziva pro zvolený kombinovaný způsob sušení a porovnáme ho s jiným kombinovaným způsobem. Výhodnost je především určená ekonomikou sušení (Trebula & Klement, 2002).

6. Porovnání sušáren

6.1.Firma Katres s.r.o.

Firma Katres s.r.o. je na trhu již od roku 1991. Tato Jihlavská firma se zabývá technologií sušení dřeva a je jedním z hlavních světových dodavatelů. Má širokou škálu odvětví a to od zemědělství, energetických technologií, dřevozpracujícího průmyslu až po termickou úpravu dřeva. Firma má za dobu své působnosti dokončeno přes 3 000 dodávek po celém světě. Firma má 35 zaměstnanců a jejich obrat činí přes 10 milionů Eur. Jsou také držitelem certifikátu jakosti ISO 9001:2008.

Hlavní filozofií firmy je spokojenost zákazníka. K čemuž využívají odborných znalostí, moderních postupů a tím dosahují nejvyšší kvality. Plní požadavky zákazníků tím, že mají pod kontrolou celý proces od zadání výrobku až po konečnou montáž. Za to zodpovídá tým odborníků. Před dodáním provádějí výstupní kontrolu jakosti. Jejich realizované projekty jsou k nalezení ve Skandinávii i v Jižní Americe (Katres, 2017).

6.2.Firma Hildebrand Brunner

Tato firma sídlí od roku 1950 v Německu v Gehrden u Hanoveru. Od té doby po celém světě dodali kolem 15 000 sušáren. Firma má patentovány nejmenší a největší vakuové sušárny. Firma jako první zavedla velkokapacitní sušárnu s ventilátory. Vyrábějí zvláštní sušárny pro stavební materiál, druhotné suroviny, potravinové výrobky, atd. Snaží se o snížení emisí CO₂ a úspory energie, a to tím, že staví takzvané zelené sušárny. Toto přispívá k dosažení ambiciózních klimatických cílů. Plány v budoucnu jsou, být stále úspěšnější v nejmodernější technologii (Kronseder, 2017).

6.3.Firma Nardi Internacional s.r.l.

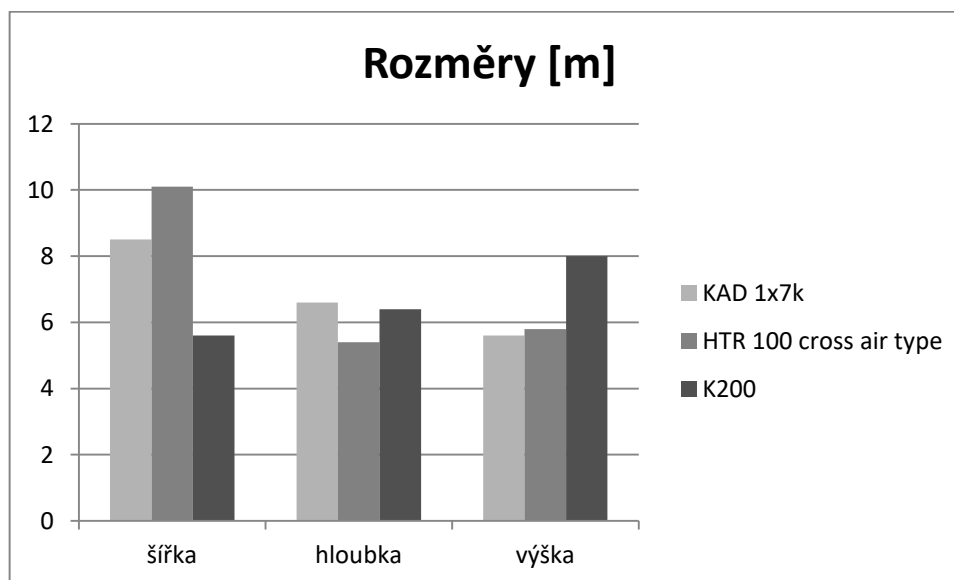
Společnost Nardi sídlí v Itálii v San Bonifacio poblíž Verony. Vznikla v roce 1974 a je jedním z předních výrobců sušáren. Firma může nabídnout špičkový výkon a kompletní služby. Své výrobky distribuují do více než 90 zemí po celém světě. Na pěti kontinentech má firma dobře vybavené podpůrné a servisní struktury. Vyvinuly počítačové vybavení a elektronický systém řízení na dálku. Všechny jejich výzkumy s přesnými metodami, provádějí profesionální odborníci (Nardi, 2017).

6.4. Grafické porovnání dle jednotlivých parametrů

Tabulka 4 Typy komorových sušáren, jejich parametry a cena

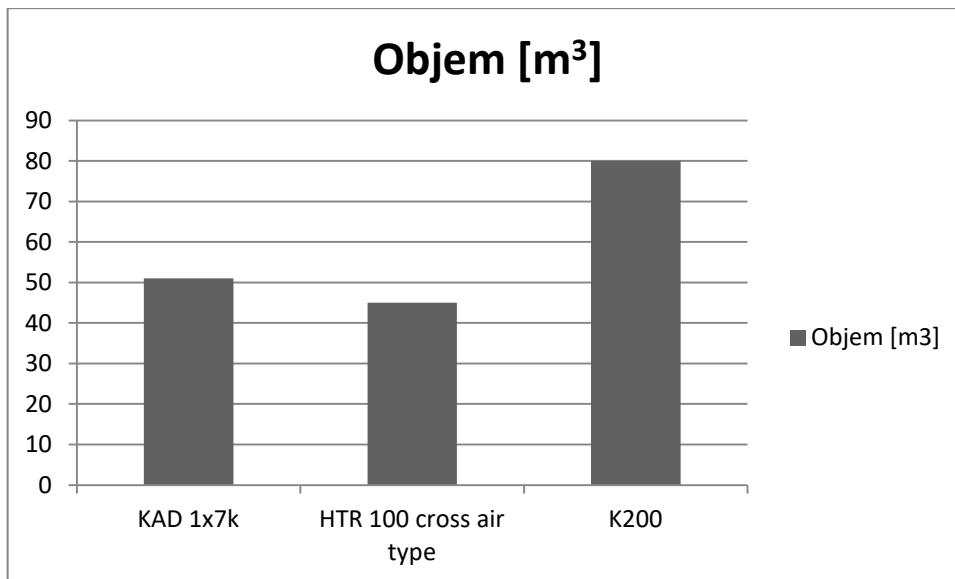
Typ	Rozměr [m]			Objem [m ³]	Výkon [kW]	Počet ventilátorů	Cena [Kč]
	šířka	hloubka	výška				
KAD 1x7k	8,5	6,6	5,6	51	143	5	1 250 000
HTR 100 cross air type	10,1	5,4	5,8	45	157	3	1 025 500
K200	5,6	6,4	8	80	152	4	1 306 800

V tabulce č. 4 jsou tři typy sušáren a jejich parametry. Jako porovnávací parametry jsou zvoleny rozměry sušárny, její objem, výkon, počet ventilátorů a cena. Cena je pouze přibližná.



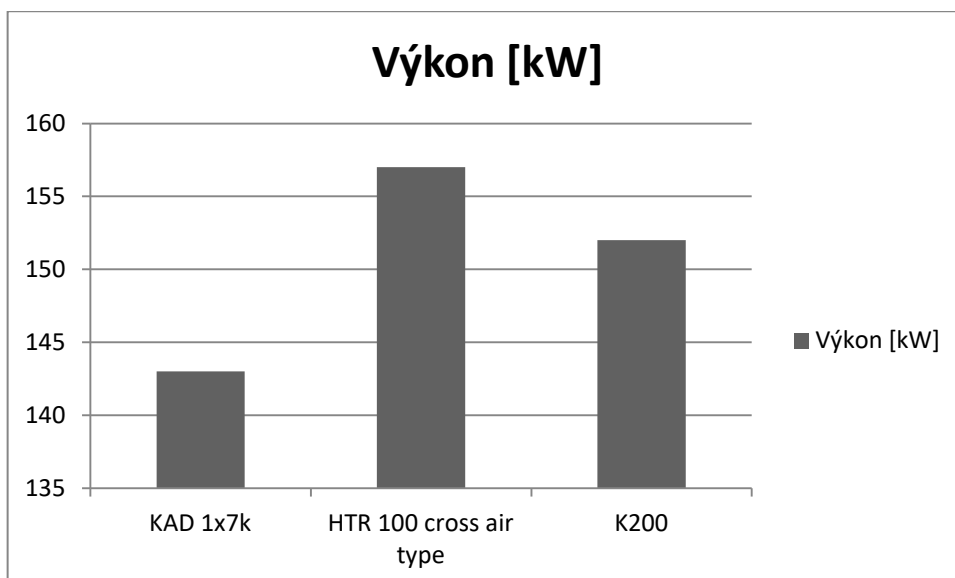
Graf 1 Porovnání rozměrů sušáren

Po porovnání vnějších rozměrů sušáren vyšla nejlépe sušárna K200 od firmy Nardi. Podle mého názoru je lepší když má sušárna menší rozlohu a je více do výšky, protože pak nezabírá tolik místa. Sušárna K200 je o 4,5 m užší ale o 1 m delší než HTR 100 cross air type, a o 2,9 m užší a o 0,2 m kratší než KAD 1x7k. Na výšku je na tom sušárna K200 nejlépe.



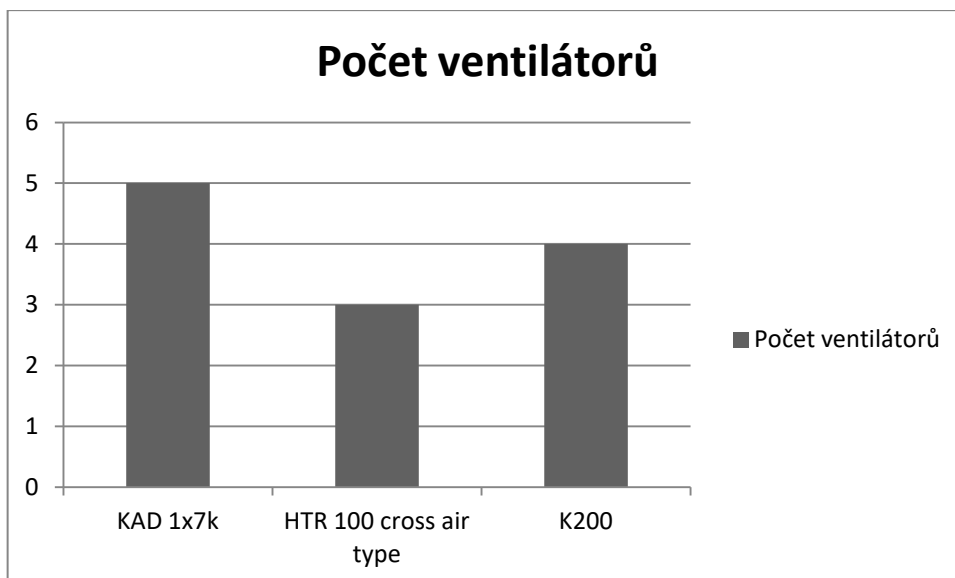
Graf 2 Porovnání objemu sušáren

Po porovnání objemu (kolik se vejde do sušárny řeziva) je z grafu č. 2 vidět, že nejlépe je na tom sušárna K200 od firmy Nardi a to svým objemem 80 m^3 , který je o 29 m^3 větší, než u sušárny KAD 1x7k a o 35 m^3 větší, než u sušárny HTR 100 cross air type.



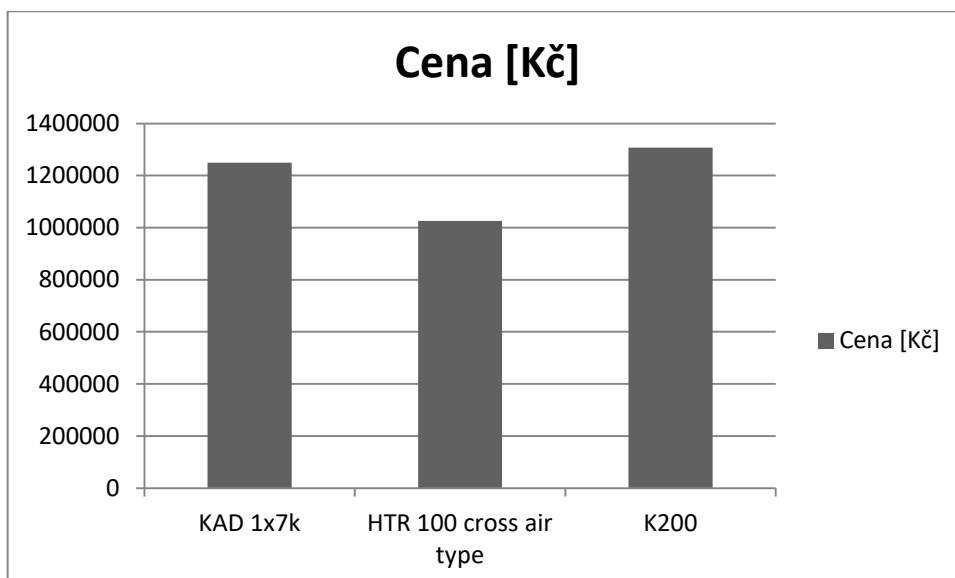
Graf 3 Porovnání výkonu sušáren

Po porovnání výkonu je z grafu č. 3 viditelné, že je na tom nejlépe sušárna HTR 100 cross air type od firmy Hildebrand s výkonem 157 kW. Je o 5 kW větší, než u sušárny K200 a o 14 kW větší, než u sušárny KAD 1x7k.



Graf 4 Porovnání dle počtu ventilátorů v sušárnách

V grafu č. 4 je porovnání typů sušáren dle počtu ventilátorů. Pro co nejlepší proudění vzduchu, tepla a vlhkosti je lepší vyšší počet ventilátorů a to má v tomto případě sušárna KAD 1x7k od firmy Katres se svými pěti ventilátory. Sušárna HTR 100 cross air type má pouze tři ventilátory a sušárna K200 má čtyři ventilátory.



Graf 5 Porovnání cen sušáren

V posledním grafu č. 5 je porovnání, přibližných cen. Konkrétní ceny nemohou být zveřejněny z důvodu mlčenlivosti. Z cenového hlediska je lepší, pokud je cena co nejnižší, z čehož vyplývá, že nejlépe na tom je sušárna HTR 100 cross air type od firmy Hildebrand.

6.5.Výsledek z porovnání

Tabulka 5 Celkové porovnání

Typ	Rozměr [m]			Objem [m ³]	Výkon [kW]	Počet ventilátorů	Cena [Kč]	
	šířka	hloubka	výška					
KAD 1x7k	8,5	6,6	5,6	51	143	5	1 250 000	
HTR 100 cross air type	10,1	5,4	5,8	45	157	3	1 025 500	
K200	5,6	6,4	8	80	152	4	1 306 800	
Váha	6	6	6	6	9	6	9	Celkem
KAD 1x7k	2	1	1	2	1	3	3	13
HTR 100 cross air type	1	3	2	1	5	1	5	18
K200	3	2	3	3	3	2	1	17

V tabulce č. 5 je celkové porovnání sušáren. Na základě udělených bodů důležitosti. Každý parametr dostal počet bodů dle důležitosti a body se dále rozdělili k jednotlivým typům sušáren. Tím vyšlo, že z tohoto výběru na tom je nejlépe komorová sušárna od německé firmy Hildebrand Brunner typ HTR 100 cross air type. Má sice nejmenší objem a nejméně ventilátorů, ale největší výkon a nejlepší cenu.

Metodika

Pro vypracování této práce byla použita odborná literatura zabývající se sušením a hydrotermickou úpravou dřeva. Z těchto literatur byly čerpány informace o přípravných pracích (vyrovnání hrání a určování vlhkosti), plánování sušícího procesu (doba, příprava sušárny, měření, teplota vzduchu), sušící proces a konečné ošetření. Dále také informace o běžně používaných sušárnách a speciálních sušárnách.

V analytické části bylo provedeno porovnání tří typů sušáren. Byly použity informace z webových stránek firem Katres s.r.o., Nardi Internacional s.r.l. a Hildebrand Brunner, které byly použity pro popis firem. Na vypracování tabulek autorka vybrala od každé firmy jednu komorovou sušárnu a k ní vhodné parametry. Tedy rozměry, objem, výkon, počet ventilátorů a cena. Těmto parametrům byly rozděleny body určité váhy, které byly následně přiřazeny k jednotlivým typům sušáren. Pomocí této analýzy vyšel výsledek, že nejlépe vychází sušárna HTR 100 cross air type od německé firmy Hildebrand Brunner. Většina těchto parametrů byla získána přímo od výrobce, ceny jsou ovšem jen přibližné.

Diskuze

Výsledkem porovnání nejlépe vyšla komorová sušárna od německé firmy Hildebrand Brunner typu HTR 100 cross air type, především z důvodu nízké ceny a velkého výkonu. Ceny od výrobců jsou ovšem jen přibližné. Kdyby výrobci poskytovaly všechny parametry přesně, bylo by i porovnání přesnější. Byla by ovšem možnost, že by se výsledky mohly lišit.

Závěr

V bakalářské práci je popsán základní proces sušení, jeho příprava, plánování a konečné ošetření. Tento proces autorka hodnotí jako vhodný pro komorové sušení. Pokud by ale popis procesu měl sloužit jako návod na umělé sušení dřeva, tak by nebyl vyhovující. K tomu by byla potřeba dalších a hlavně přesnějších informací. Také kvalifikovanou obsluhu, která dokáže proces naplánovat a zadat do počítače. Další řešení jak vylepšit práci na téma proces umělého sušení dřeva, je výzkum. Součástí výzkumu by bylo naplánování procesu, ale především vlastní sušení a dále porovnávání výsledků sušení.

Dále jsou popsány způsoby sušení a to komorové sušení, kontinuální (vakuové) sušení a vysokoteplotní sušení. Tyto způsoby jsou nejběžnější a nejčastěji používané. Spolu s nimi jsou také popsány i speciální způsoby sušení. Mezi těmito způsoby je nejznámější vakuové sušení, nebo také kondenzační či kontaktní sušení. Umělé sušení dřeva lze však provádět i v kapalinách a také kombinací již zmíněných způsobů.

V další části jsou jmenované tři firmy zabývající se sušárkami. Každá z firem pochází z jiné země, a to z České Republiky firma Katres s.r.o., z Německa firma Hildebrand Brunner a z Itálie firma Nardi Internacional s.r.l. Z každé firmy byla vybrána jedna sušárna. Následně mezi sebou byly porovnávány 3 typy sušáren. K porovnání sušáren byly poskytnuty údaje od firem, a z nich byly vytvořeny parametry k porovnávání. Těmto parametrům byly uděleny body určité váhy, přiřazené k jednotlivým typům sušáren. Pomocí tohoto způsobu nejlépe vyšla komorová sušárna od německé firmy Hildebrand Brunner typu HTR 100 cross air type s rozměry 10,1x5,4x5,8 m, objemem 45 m³, výkonem 157 kW, třemi ventilátory a cenou 1 025 500 Kč. Tato sušárna má nejmenší objem a počet ventilátorů avšak má velký výkon a nejnižší cenu.

Údaje od výrobců nebyly kompletní. Parametry které byly zvoleny, jako rozměry, objem, výkon, počet ventilátorů a ceny, byly v poskytnutých informacích vyplněny. Avšak některé ceny poskytnuté firmami pro tuto bakalářskou práci nebyly zcela konkrétní z důvodu konkurenčního boje, proto byla zachována mlčenlivost. Pokud by byly veškeré informace známé a přesné, výsledky porovnání by byly přesnější a je možnost že by se lišily, takže by nejlépe vyšla jiná komorová sušárna.

Sušení dřeva má velice významnou roli ve zpracování dřeva. Je neodmyslitelné pro uskutečnění dalších dřevařských technologií. U umělého sušení je to několika denní proces, kdy je řezivo vystaveno vyšším teplotám, dochází k uvolnění vlhkosti a odčerpání mimo sušárnu, aby nedošlo k absorpci vlhkosti zpět do řeziva. Po vysušení má dřevo nižší hmotnost, vlhkost a také přispívá k likvidaci škůdců ve dřevě.

Vysušené dřevo se využívá například na výrobu nábytku. Je důležité, aby bylo vysušené správně na 8 - 12 %, aby nedocházelo k deformacím. K deformacím může docházet jak během výroby, tak i následně po vyhotovení a užívání výrobku. Problémy jako je deformace či napadení houbami se mohou vyskytnout i v dalších oblastech použití dřeva. Pro kvalitní zpracování dřeva je správné sušení důležitý proces.

Bibliografie

1. Bollmann, L. (1977). *Leitfaden der Schnittholztrocknung*. Selbstverlag .
2. Bousquet, D. W. (1981). *Drying Wood. Univ. Of Vermont Extension Brieflet 1326* . Vermont.
3. Dekrét, A., & Trebula, P. (1997). *Niektoré teoretické problémy sušenia dreva 1. vyd.* Zvolen: TU.
4. Glijer, L. (1995). *Suszenie drewna w suszarkach*. Warszawa: Ryko.
5. Houška, K., Valchář, J., & Viktorin, Z. (1984). *Návrh sušáren pomocí počítače*. Praha: SNTL.
6. Hulinský, P., & Bittmann, R. (2009). Učební text pro obor Truhlář 2. ročník. Brno, ČR.
7. Janik, W. (1965). *Handbuch der Holztrocknung*. Leipzig: VEB Fachbuchverlag.
8. Kadleček, F. (1980). *Materiály pro 1. a 2. ročník středních prům. škol dřevařských*. Praha: SNTL.
9. Klement, I. (1995). *Mikrovlnné sušenie dreva*. Zvolen: Technická univerzita.
10. Kollmann, F. (1965). *Holyrocknung*. Stuttgart: DRW-Verlags.
11. Kruml, J. (1974). *Umělé sušení řeziva*. Praha: SNTL.
12. Lysý, F., & Jírů, P. (1954). *Nauka o dřevě*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury.
13. Matovič, A. (1988). *Nauka o dřevě*. Brno: VŠZ.
14. Peleška, K. (1963). *Přirozené sušení řeziva. 1. vyd.* Praha: Státní nakadatelství technické literatury.
15. Ressel, J. (1994). State of art report on vacuum drying of timber. Rotorua: IUFRO.
16. Skaar, C. (1972). *Water in wood*. Kalifornie: Kalifornská univerzita.
17. Trebula, P., & Dekrét, A. (1987). *Vákuové sušenie reziva*. Zvolen: VŠLD.
18. Trebula, P., & Klement, I. (2002). *Sušenie a hydrotémická úprava dreva*. Zvolen: Technická univerzita v Zvolene.

19. Trebula, P., Joščák, P., & Klement, I. (1994). *Vákuové sušenie dreva a jeho fyzikální vlastnosti*. Zvolen: Zvolen TU.
20. Trebula, T. (1994). *Metodika a režimy umelého sušenia technických drevín v komorových sušiarňach reziva*. Bratislava: ŠDVÚ.
21. Valchař, J. a. (1967). *Základy sušení*. Praha: SNTL.

Internetové zdroje

22. Katres. (2017). *Katres Drying Technology*. Získáno 2017, z <http://www.katres.cz/>
23. Kronseder. (2017). *Hildebrand Brunner*. Získáno 2017, z <http://www.brunner-hildebrand.com/>
24. Nardi. (2017). *Nardi International s.r.l.* Získáno 2017, z <http://www.nardi.it/eng/home.html>
25. Vinter, B. (2015). Získáno 23. 10 2015, z ftp://15-68-80-78.tmcz.cz/knihovna/TRUHLARI/PREZENTACE/001_Technologie_I/003%20-%20Suseni%20dreva/Suseni_dreva_c_-_Umele_suseni_dreva_-_Krupalova.ppt.
26. Zejda, J. (11. 5 2009). <http://ldf.mendelu.cz>. Získáno 4. 11 2015, z http://ldf.mendelu.cz/und/sites/default/files/soubory_hud/javorice_suseni_v1.pdf