



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

## METODY SUŠENÍ BIOMASY

BIOMASS DRYING METHODS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Beran

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2018

## Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	<b>Petr Beran</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Energetika, procesy a životní prostředí
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### Metody sušení biomasy

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vlhkost biomasy má zásadní vliv na proces spalování paliva ve spalovací komoře. Obsahem práce bude popis principů sušení tuhých látek a výběr vhodných technologií pro sušení různých typů biomasy. Dále bude provedena rešerše technologií, které se v současné době pro sušení biomasy využívají. V závěru práce pak bude provedeno bilanční porovnání vybraných typů sušáren.

#### Cíle bakalářské práce:

- přehled principů sušení pevných látek
- rešerše technologií sušení biomasy včetně vzájemného porovnání
- provedení bilančních výpočtů vybraných sušáren
- vyhodnocení výsledků

#### Seznam doporučené literatury:

PAVELEK, Milan. Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-8-214-4300-6.

ŠESTÁK, Jiří a Rudolf ŽITNÝ. Tepelné pochody II: výměníky tepla, odpařování, sušení, průmyslové pece a elektrický ohřev. Vyd. 2. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006c1997, 165 s. ISBN 80-01-0345-5.

TSOTSAS, Evangelos a Arun S. MUJUMDAR. Modern drying technology: Volume I, Computational Tools at Different Scales. 1. Weinheim: John Wiley, 2007. ISBN 978-3-527-31556-7.



## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá biomasou a principem sušení tuhých látek, dále je zde podrobná rešerše sušáren biomasy a v závěrečné části práce je zhotoven bilanční výpočet bubnové sušárny a výpočet vlastností spalin.

### **Klíčová slova**

Biomasa, sušení, sušárna, vlhkost, tepelná bilance

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis deals with biomass and principle of drying solids, in next part there is a detail research of biomass dryers and final part of thesis deals with balance calculation of drum dryer and a calculation of flue gases properties.

### **Key words**

Biomass, drying, dryer, humidity, heat balance

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

BERAN, P. *Metody sušení biomasy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 46 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D..

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Metody sušení biomasy** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....  
Datum

.....  
Jméno a příjmení

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto doc. Ing. Marku Balášovi Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce a dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během studia.

-----  
podpis

## OBSAH

ÚVOD .....	10
1 Biomasa.....	11
1.1 Základní rozdělení biomasy .....	11
1.2 Obecné využití biomasy .....	11
1.3 Hrubý rozbor biomasy jako paliva .....	12
1.4 Výhřevnost biomasy.....	12
1.5 Energetické vlastnosti biomasy .....	13
1.6 Vlhkost biomasy.....	13
1.7 Možnosti snížení vlhkosti biomasy .....	14
1.7.1 Pasivní sušení.....	14
1.7.2 Aktivní sušení .....	14
2 Sušení .....	16
2.1 Sušící prostředí .....	17
2.2 Statika sušení .....	18
2.3 Kinetika sušení .....	19
3 Metody sušení .....	20
4 Sušárny.....	22
4.1 Klasifikace sušáren.....	22
4.2 Konvekční sušárny .....	23
4.2.1 Komerová sušárna .....	23
4.2.2 Pásová sušárna .....	23
4.2.3 Bubnová sušárna.....	24
4.2.4 Fluidní sušárna.....	25
4.2.5 Proudová sušárna .....	26
4.3 Kondukční sušárny .....	26
4.3.1 Válcová sušárna .....	26
4.3.2 Lopatková sušárna .....	27
4.3.3 Bubnová sušárna.....	27
4.4 Radiační sušárny.....	27
4.4.1 Sušárna s dielektrickým ohřevem.....	28
4.4.2 Sušárna s infračerveným ohřevem.....	28
4.4.3 Mikrovlnná sušárna .....	29
4.5 Porovnání sušáren.....	29

---

5	Bilanční výpočet bubnové sušárny .....	30
5.1	Bilance sušené biomasy .....	30
5.2	Tepelná bilance sušárny .....	31
5.3	Stechiometrie spalin .....	31
5.3.1	Objem vzduchu .....	32
5.3.2	Složky spalin .....	32
5.4	Výpočet množství paliva .....	35
5.4.1	Výpočty entalpií .....	35
5.4.2	Výpočet ztrát kotle .....	36
5.4.3	Výpočet účinnosti kolte nepřímou metodou .....	37
5.4.4	Výpočet množství paliva .....	37
5.4.5	Další výpočty sušárny .....	37
5.5	Výpočet teoretických rozměrů sušárny .....	38
	ZÁVĚR .....	39
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	40
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	42
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	45
	SEZNAM TABULEK .....	46

## **ÚVOD**

S pojmem biomasa se dnešní době setkávají lidé čím dále tím častěji, pravdou ale je, že lidé využívají biomasu už skoro 10 tisíc let. Co je ale nové, je lidské přemýšlení ohledně ekologie a vztahu člověka k přírodě a způsob využití biomasy jako obnovitelného zdroje energie. Lidé začali biomasu využívat jako zdroj tepla, elektřiny, nebo dokonce jako zdroj energie pro dopravní prostředky. Abychom mohli spálením uvolnit z biomasy, co nejvíce energie je třeba ve většině případů ji ještě nějak zpracovat. Největším problémem čerstvě vypěstované, nebo sklizené biomasy je obsah vody, který značně omezuje množství uvolněného tepla při spálení. Možným způsobem jak zvýšit efektivitu spalovacího procesu je odstranění vody v biomase vysušením.

Cílem této práce je přehled principů sušení pevných látek, provést rešerši technologií sušení biomasy v sušárnách a nakonec provést bilanční výpočet dané sušárny a výsledky zhodnotit.

## 1 Biomasa

Pod pojmem biomasa se v energetice rozumí veškerá organická hmota tedy těla všech organismů (bakterií, hub, rostlin, živočichů...). Získání tepelné, nebo elektrické energie z biomasy spaláním je nejběžnější způsob a je jím získávána energie z 90 procent na celém světě.

### 1.1 Základní rozdělení biomasy

Biomasu lze rozdělit podle různých kritérií, v energetice je nejdůležitější energeticky využitelná biomasa. Jedná se hlavně o rychle rostoucí dřeviny a rostliny bylinného charakteru. Předností této biomasy musí být snadný výsev a krátké vegetační období. Což v podstatě znamená možnost co nejrychlejšího energetického využití.

#### Rozdělení energeticky využitelné biomasy:

- Fytomasa – rostlinná hmota obecně
- Dendromasa – speciálně stromy
- Cíleně pěstovaná (energetická) biomasa – rychle rostoucí dřeviny (topol, vrba, olše, akát...) a rostliny bylinného charakteru (konopí, šťovík, kostřava...)
- Biopaliva
  - Pevná
  - Kapalná
  - Plynná
- Odpadní biomasa
  - Z rostlinné výroby – sláma, zbytky z čištění zrnin, plevky
  - Z živočišné výroby – močůvka, hnůj, kejda
  - Z těžby a zpracování dřeva – piliny, hobliny, odřezky
- Biologicky rozložitelný odpad (BRO)
  - Komunální (BRKO) – zbytky potravin, papírové obaly
  - Průmyslový (BRPO) – cukry, mouky, odpady z výroby papíru, odpady z jatek
  - Splašky z kanalizace [6]

#### Rozdělení podle vlastností biomasy:

- Suchá – lze ji spalovat přímo
- Vlhká – nelze spalovat přímo, nutnost dalšího technologického postupu (např. sušení, výroba bioplynu), patří zde např. tekuté odpady z živočišné výroby, tekuté komunální odpady
- Speciální – olejniný, škrobovitý a cukernatý plodiny (k získávání energetických látek) – bionafta, líh [7]

### 1.2 Obecné využití biomasy

**Biomasa jako potrava** – Nejdůležitější a nejstarší využití biomasy, jako potravu pro lidi a zvířata.

**Biomasa jako zdroj tepla pro vytápění** – Teplo z biomasy se nejčastěji vyrábí tím nejjednodušším způsobem a to spalováním. Dokonalým spalováním biomasy vznikne oxid uhličitý

a voda, v opačném případě může dojít ke vzniku nežádoucích oxidů dusíku a jiných toxických látek. Hoření biomasy je řetězec složitých chemických reakcí, které na sebe navazují.

**Biomasa jako zdroj energie pro výrobu elektřiny** – V současné době se největší část elektrické energie vyrábí z uhlí, ropy, zemního plynu a dalších fosilních paliv v budoucnu se však tyto paliva čím dál, tím více budou nahrazovat biomasou což má své výhody i nevýhody.

**Biomasa jako zdroj energie pro dopravní prostředky** – Využívání biomasy jako paliva pro dopravní prostředky se stalo v poslední době významnou metodou využití biomasy, výhodou je zde hlavně ekologický význam.[1]

### 1.3 Hrubý rozbor biomasy jako paliva

Biomasa jako palivo patří právě k nezákladnějším tuhým palivům. Složení tuhých paliv je určováno hrubým rozбором. Hrubý rozbor určuje poměr mezi vodou ( $W^r$ ), popelovinou ( $A^r$ ) a hořlavinou ( $h$ ) v palivu.

$$\text{Kde } W^r + A^r + h = 100 \%$$

Tabulka 1.1 Hrubý rozbor paliva [9]

Přimísená voda	Surové uhlí			
	Voda ( $W^r$ )	Popelovina ( $A^r$ )	Hořlavina ( $h$ )	
Přítěž (balast)			Tuhý podíl	Prchavý podíl
Bezvodé uhlí (sušina)				
Spálením vznikne:				
Vodní pára		Tuhé zbytky (škvára, popílek)	Spaliny	

**Voda v palivu** – Snižuje výhřevnost paliva a způsobuje potíže při jak spalování paliva, tak při dopravě paliva (zamrznání). Proto je sušení biomasy důležitým procesem. Čím je palivo geologicky starší tím méně vody obsahuje.

**Popelovina v palivu** – Popelovina v palivu zastupuje minerální látky v palivu (křemičitany, sírany, uhličitany...) před jejich spálením. Po spálení popeloviny vznikne tuhý zbytek neboli popel.

**Hořlavina** – Část paliva, která je nositelem tepla uvolněného při spalování. Jde o prvky: Uhlík, vodík, síra, přičemž je síra v palivu nežádoucí, protože zvyšuje rosný bod a také zvyšuje obsah oxidů síry ve spalinách.[9]

### 1.4 Výhřevnost biomasy

Výhřevnost je nejdůležitější vlastností paliva jak z pohledu energetického, tak z pohledu ekonomického. Výhřevnost je definována jako: Teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na 20 °C, přičemž voda obsažená ve spalinách nezkondenzuje.

$$\text{Výhřevnost je určena vztahem: } Q_i^r = Q_s - r \cdot (W^r + 8,94 \cdot H_2) \quad (1.1)$$

Kde:

$W^r$  – obsah vody v palivu [-]

$r$  – výparné teplo vody [kJ/kg]

$H_2$  – obsah vodíku v surovém palivu [-]

### 1.5 Energetické vlastnosti biomasy

Energetický rozsah biomasy je velké míře podobný, přestože je biomasa tvořena různou škálou rostlin. Výhřevnost biomasy se pohybuje okolo 15 – 19 MJ/kg látky.

Tabulka 1.2 Výhřevnost různých druhů biomasy [1]

druh paliva	obsah vody	výhřevnost
	[%]	[MJ/kg]
Listnaté dřevo	15	14,60
Jehličnaté dřevo	15	15,58
Borovice	20	18,40
Vrba	20	16,90
Buk	20	15,50
Smrk	20	15,30
Dřevní štěpka	30	12,18
Sláma obilovin	10	15,49
Sláma kukuřice	10	14,40
Lněné stonky	10	16,90

### 1.6 Vlhkost biomasy

Velkým problémem u čerstvě sklizených rostlin je, že obsahují veliké množství vody. Jelikož má voda vysoké výparné teplo, klesá energetický zisk s množstvím vody v biomase. Před spálením je tedy vhodné biomasu ještě vysušit, aby se zvětšilo množství tepla, které se uvolní při spálení. Vlhkost biomasy pod 20 % se považuje za optimální, lze jí ještě dosáhnout běžným sušením na vzduchu. Ale například pro lisování pelet, se musí biomasa vysušit na ještě nižší hodnoty vody a to nelze docílit běžným sušením na vzduchu.

Vlhkost biomasy lze vypočítat dvěma způsoby:

Vlhkost v energetice se vyjadřuje následujícím vztahem:

$$w_e = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (1.2)$$

Vlhkost v dřevozpracujícím průmyslu lze vyjádřit vztahem:

$$w_d = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100 [\%] \quad (1.3)$$

Kde  $m_1$  je hmotnost vlhkého vzorku a  $m_2$  hmotnost suchého vzorku, přičemž v dřevozpracujícím průmyslu může vlhkost přesahovat 100 %.



Obr. 1.1 Závislost výhřevnosti na vlhkosti biomasy [1]

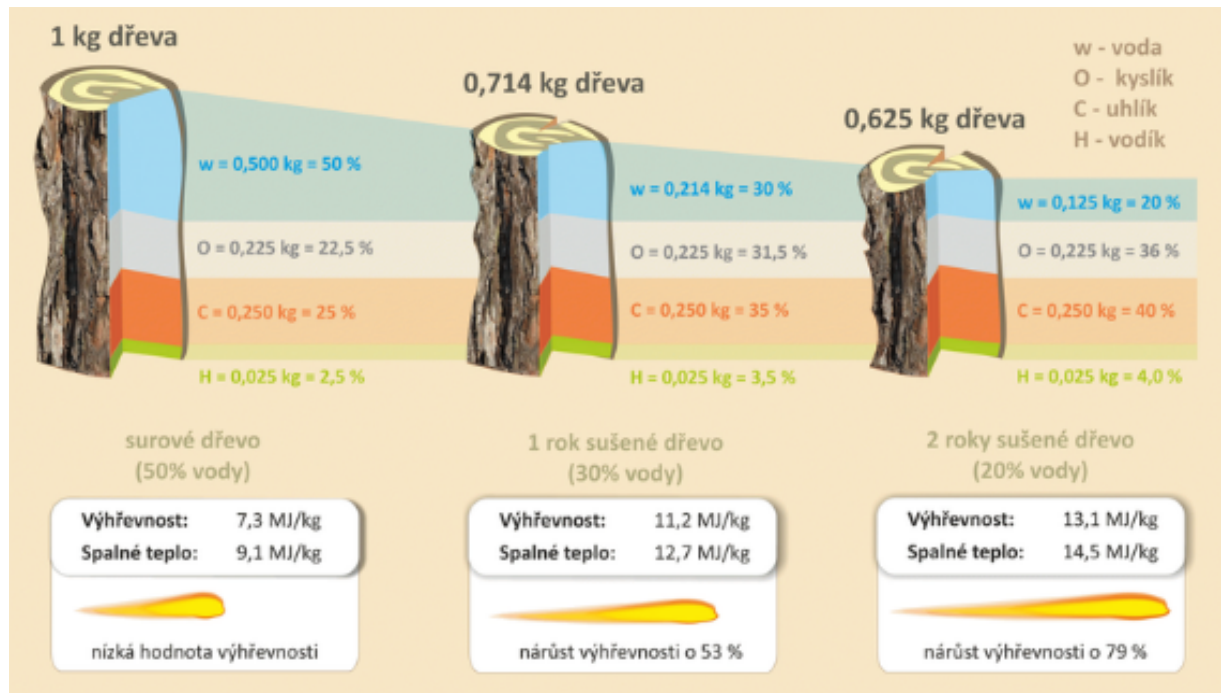
## 1.7 Možnosti snížení vlhkosti biomasy

### 1.7.1 Pasivní sušení

Pasivní sušení je nejjednodušší a nejlevnější a nejméně energeticky náročný způsob sušení materiálu, na druhou stranu je tento proces časově náročný a materiál nelze dosušit na požadovanou vlhkost např. pro výrobu dřevních pelet nebo briket. Při pasivním sušení je biomasa ponechána volně ležet, nejlépe pod přístřeškem za přístupu vzduchu. Čerstvě vytěžené dřevo mívá vlhkost okolo 50 %, a je možno při běžném sušení pod střechou s dobrým provětráváním snížit jeho vlhkost na 20 % za 1 až 2 roky.

### 1.7.2 Aktivní sušení

Aktivní sušení je proces, při kterém musíme dodávat energii z vnějšího zdroje, abychom urychlili sušení a co nejrychleji snížili vlhkost biomasy. Aktivní sušení je energeticky a ekonomicky náročný proces, který využíváme pouze, chceme-li dosáhnout určité hodnoty výstupní vlhkosti materiálu. K aktivnímu sušení dochází v sušárnách. Tato práce se dále věnuje metodě aktivního sušení.



Obr. 1.2 Snižování vlhkosti pasivním sušením [11]

## 2 Sušení

Sušení je proces, při kterém se odstraňuje vlhkost v podobě vody z dané látky. V energetice se procesu sušení nejčastěji využívá pro zvýšení výhřevnosti a pro dosažení dokonalejšího průběhu spalování dané látky. U sušených materiálů jsou nejdůležitějšími vlastnostmi obsah vody a její vazby na sušený materiál. Obsah vody v materiálu určuje:

**Měrná vlhkost**  $X_A$ , která je dána poměrem kg vody na kg sušiny.

**Relativní vlhkost**  $\varphi$ , která je dána poměrem kg vody na kg vlhkého materiálu.

Formu jakou je voda vázána na materiál lze rozdělit do tří odvětví:

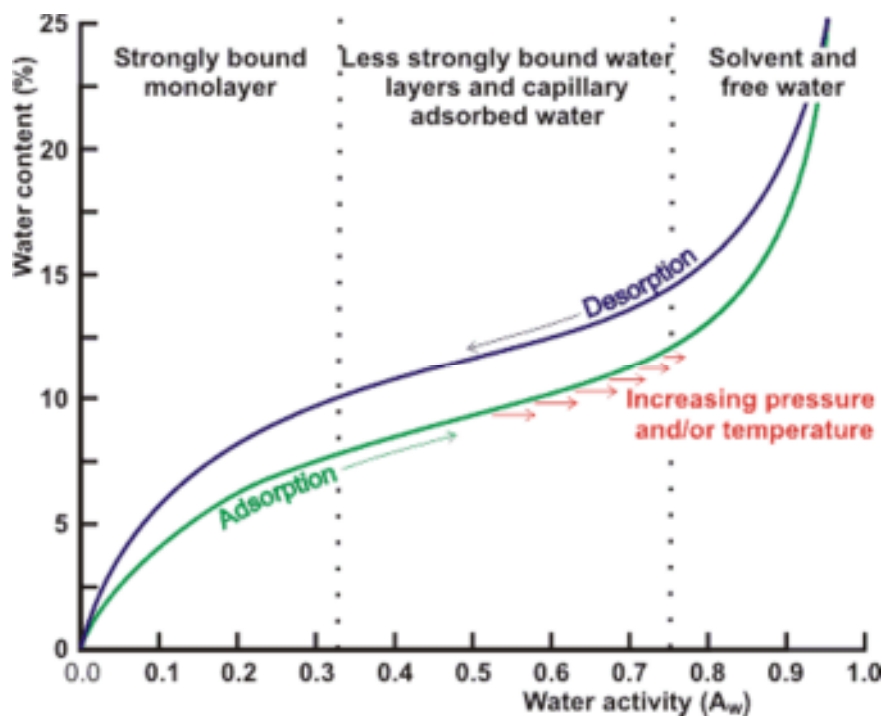
- **Fyzikálně mechanické vazby (volná voda)** – Kapalina je na povrchu tuhé fáze vázaná na materiál svým povrchovým napětím. Tlak par volné vody je stejný jako tlak kapaliny s volným povrchem.
- **Fyzikálně chemické vazby (voda vázaná hygroskopicky)** – Voda se nachází v buněčných stěnách. Tlak par nad kapalinou vázanou hygroskopicky je nižší, než tlak nad rovným povrchem kapaliny při stejné teplotě. Při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností má takto vázaná voda největší význam.
- **Chemické vazby** – Molekuly vody jsou vázány na místech povrchu silami částečně chemické povahy. Voda takto vázaná, nelze odstranit sušením, pouze spálením.

K sušení dochází tehdy, když je tlak par kapaliny v tuhé fázi vyšší, než tlak par kapaliny v okolním prostředí. V opačném případě materiál vlhne. Forma vazby vody na materiál určuje také, jak moc velkou energii musíme vynaložit, abychom dostali vodu z materiálu pryč. Vzniklé vazby závisí na struktuře a měrné vlhkosti materiálu. Strukturu materiálu lze rozdělit podle velikosti pórů na:

- Makroporézní – kapilární síly jsou srovnatelné s gravitačními
- Makrokapilární – průměry kapilár jsou větší než  $10^{-4}$  mm
- Mikrokapilární – průměry kapilár jsou menší než  $10^{-4}$  mm

Síla vazby je dána tím, že parciální tlak vodních par na povrchu materiálu je menší, než tlak sytých vodních par při dané teplotě (u makroporézních materiálů platí, že parciální tlak vodních par je roven tlaku sytých vodních par) poměr těchto tlaků je tzv. aktivita vody, tato veličina má především význam u konzervace potravin. Snížením aktivity vody na hodnotu 0,9 lze zamezit tvorbě bakterií, na hodnotu 0,8 kvasinek a na hodnotu 0,75 plísní. Při sušení tak nemusí být jen hlavním cílem dosažení určité měrné vlhkosti, ale také určité dosažení aktivity vody. [3]

Závislost měrné vlhkosti materiálu  $X_A$  na rovnovážné relativní vlhkosti (resp. aktivitě vody) vzduchu  $\varphi$  nám určuje sorpční izoterma, kde desorpce znamená sušení a adsorpce vlhnutí.:



Obr. 2.1 Sorpční izoterma [8]

Z grafu lze určit jakou nejmenší měrnou vlhkost  $X_A$  na kterou lze materiál vysušit při relativní vlhkosti sušícího prostředí  $\phi$ . Dále lze z tvaru sorpční izotermy předpokládat vázané množství vody: Monomolekulární adsorpci (konkávní průběh), polymolekulární adsorpci nebo kapilárními silami a podíl volné vody.

## 2.1 Sušící prostředí

Hlavním úkolem sušícího prostředí je převádět teplo do sušeného materiálu a zároveň odvádět vlhkost. Sušícím médiem může být pára nebo inertní plyny, spaliny, ale nejčastěji je používán (vlhký) vzduch. Veškeré parametry vlhkého vzduchu lze odečíst z Mollierova diagramu (h-X diagramu).

Parametry vlhkého vzduchu:

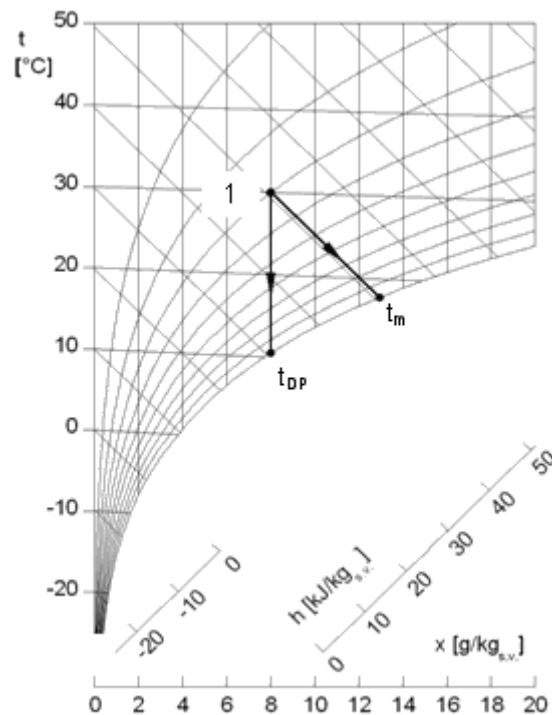
**Měrná vlhkost** –  $X_A$  relativní hmotnostní podíl vodní páry (kg páry/kg suchého vzduchu).

**Relativní vlhkost** –  $\phi$  poměr hmotnostní koncentrace páry k maximální možné koncentraci páry v nasyceném vzduchu při konstantní teplotě.

**Entalpie** – Je vztažena podobně, jako měrná vlhkost vzduchu na 1kg suchého vzduchu, tato entalpie tedy není měrnou veličinou, tj. entalpií 1 kg suchého vzduchu, ale entalpií směsi 1 kg suchého vzduchu a x kg vlhkosti. Pro suchý vzduch má entalpie nulovou hodnotu při teplotě 0 °C. [2]

**Teplota rosného bodu** –  $T_{dp}$  Je teplota při níž dochází ke kondenzaci páry, teplota při které jsou pár ve vzduchu právě sýté (souvisí hlavně s měrnou vlhkostí vzduchu).

**Teplota mokrého teploměru –  $T_{wb}$**  Teplota při které dochází k odpařování vody do okolního vzduchu. Je také teplota volné vody odpařované při první fázi sušení.



Obr. 2.2 Mollierův diagram [12]

## 2.2 Statika sušení

Statika sušení řeší materiálové bilance a energetické bilance sušícího média a sušeného materiálu.

### Látková bilance:

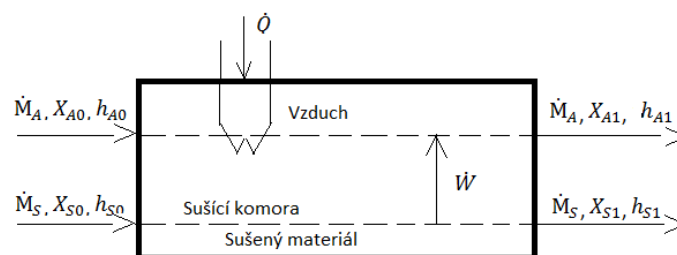
$$\dot{M}_A \cdot X_{A0} + \dot{M}_S \cdot X_{S0} = \dot{M}_A \cdot X_{A1} + \dot{M}_S \cdot X_{S1} \quad (2.1)$$

### Hmotnostní bilance:

$$\dot{W} = \dot{M}_A \cdot (X_{A1} - X_{A0}) = \dot{M}_S \cdot (X_{S0} - X_{S1}) \quad (2.2)$$

### Energetická bilance:

$$\dot{Q} = \dot{M}_A \cdot (h_{A1} - h_{A0}) + \dot{M}_S \cdot (h_{S1} - h_{S0}) \quad (2.3)$$



Obr 2.3 Bilance sušárny [3]

### 2.3 Kinetika sušení

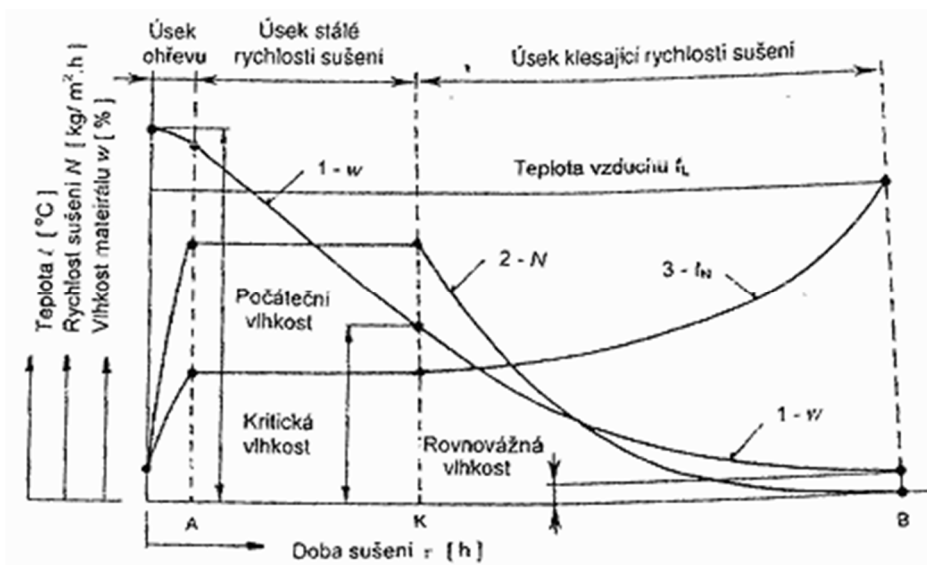
Kinetika sušení vyjadřuje rychlost sušení materiálu (množství kapaliny odstraněné z jednotky hmoty vlhkého materiálu za jednotku času). Určuje nám tedy, jak dlouho je třeba materiál sušit, nebo jak dlouhá má být kontinuální pásová sušárna, aby bylo dosaženo potřebných parametrů (měrné vlhkosti materiálu).

#### Průběh sušení:

1) **Ohřívání** – Při styku biomasy se sušícím médiem, které má vyšší teplotu a relativní vlhkost nižší než 100% dochází k sušení materiálu, materiál se začne zahřívát a rychlost sušení vzroste na maximum, což je doba, kdy teplota biomasy dosáhne bodu varu kapaliny.

2) **Úsek konstantního sušení materiálu** – Volně vázaná voda se z povrchu biomasy odpařuje konstantní rychlostí do té doby, dokud není zcela vypařena. Po celý tento úsek sušení se teplota biomasy nemění, protože se teplo, které musíme biomase dodat, spotřebuje na vypaření kapaliny.

3) **Úsek klesající rychlosti sušení** – Když je volně vázaná vlhkost odstraněna, dochází k odpařování kapaliny z pórů, časem klesá průměr pórů zaplněných kapalinou a tím se biomasa začne více zahřívát a dochází k vypařování silně vázané vlhkosti, takovéto vlhkosti je velmi málo, proto rychlost sušení klesá rychle k nule. Rychlost sušení biomasy klesá až do doby, kdy se tlak nad povrchem sušeného materiálu rovná parciálnímu tlaku par v dané sušárně.

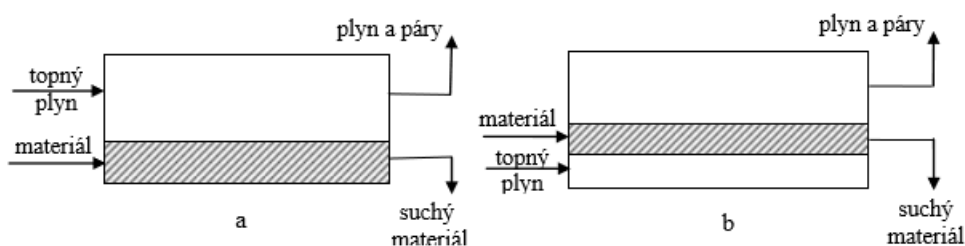


Obr 2.4 Průběh sušení [13]

### 3 Metody sušení

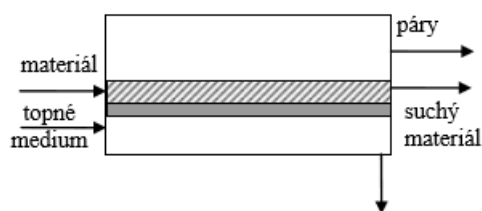
Sušení může být rozděleno do tří kategorií, podle předávání tepla media materiálu. Metody mohou probíhat za sníženého, nebo atmosférického tlaku.

1. **Konvekční sušení** – Přímý způsob sušení. Materiál přichází přímo do styku se sušicím médiem (teplý vzduch, spaliny) které zajišťuje přenos tepla a hmoty. Úkolem sušícího média je odvod vlhkosti a zároveň slouží jako teplotnosné médium, které prochází sušenou biomasou. Konvekční sušení ještě lze rozdělit na 2 metody.
  - Sušení z povrchu – Sušící medium proudí nad povrchem biomasy.
  - Sušení z objemu – Sušící medium prochází objemem biomasy, která je většinou ve fluidním stavu.



Obr. 3.1 Schéma sušení z povrchu a) a z objemu b) [4]

2. **Kondukční sušení** – Nepřímý způsob sušení, který je způsoben kontaktem teplosměnné plochy, (která je nejčastěji zahřívána párou) a sušené biomasy. Úkolem sušícího média je pouze odvod vlhkosti ze sušené biomasy. Biomasa je nanášena na teplosměnnou plochu kde může nehybně ležet, nebo se také mechanicky pohybovat. Touto metodou lze sušit termolabilní látky, nebo látky, které nemohou přijít do kontaktu se spaliny nebo vzduchem, sušení lze provozovat v podtlaku, který zintenzivní celý proces. Kondukční sušení bývá časově náročné. []



Obr. 3.2 Schéma indukčního sušení [4]

- 3. Radiační sušení** – U radiace (sálání) dochází k přenosu tepla díky elektromagnetickým vlnám, jelikož se vlny mohou šířit v jakémkoliv prostředí, k sálání může docházet i ve vakuu. Při pronikání elektromagnetických vln do povrchu sušeného materiálu je ohřívána vnitřní část materiálu a vlhkost uniká do míst, kde je nižší tlak, tedy na povrch sušeného materiálu, který je chladnější jelikož se okolní vzduch elektromagnetickými vlnami nezahřívá. Touto metodou lze vysušit materiál velmi efektivně, jelikož vlny působí hlavně na molekuly vody.

## 4 Sušárny

Sušárny jsou zařízení, ve kterých dochází k odstranění vlhkosti materiálu pomocí přenosu tepla. Vlhkost může být odstraněna odpařováním nebo sublimací. Procesy, které se v sušárnách odehrávají, jsou kombinací přenosu hmoty (odvádění vlhkosti) a tepla (přívod tepla sušenému materiálu). Pokud není uvedeno jinak, následující kapitola byla vypracována na základě poznatků z [3],[4],[14],[15],[17].

### 4.1 Klasifikace sušáren

Sušárny, nebo také sušky lze klasifikovat podle různých kritérií.[3],[17]:

Podle způsobu přívodu tepla:

- Konvekcí
- Kondukcí
- Radiací
- Kombinované

Podle sušícího media, kam se odvádí vlhkost:

- Vzduch – Nejběžnějším případem, kam odvádět vlhkost je vzduch.
- Spaliny – Výhodou spalin jako sušícího media je finanční úspora, nevýhodou však může být možnost kontaminace sušeného materiálu.
- Inertní plyny – Plyny, které mají velmi nízkou, nebo žádnou chemickou reaktivitu patří zde např. He, Ar, Xe.
- Vakuum – Odvod vlhkosti do vakua může být realizováno pouze v kondukčních a radiačních sušárnách.
- Přehřátá pára – Sušení přehřátou párou je nákladný, ale efektivní proces díky žádnému obsahu vody v objemu (zrychlení sušení).

Podle provozního tlaku sušícího media:

- Atmosférická – Sušárny pracující za atmosférického tlaku.
- Přetlaková – Sušárny pracující za zvýšeného tlaku.
- Vakuová – Sušárny pracující za minimálního tlaku.

Podle pohybu sušeného materiálu:

- V klidu – Sušený materiál se v sušárně nijak nepohybuje (např. sušárny komorové).
- Mechanické přesouvání – Sušený materiál je přepravován např. pásy nebo v rotujícím bubnu (např. pásové, bubnové, válcové sušárny).
- Pneumatické přesouvání – Sušený materiál je přepravován např. proudem horkého vzduchu (např. proudové sušárny).

Podle provozu:

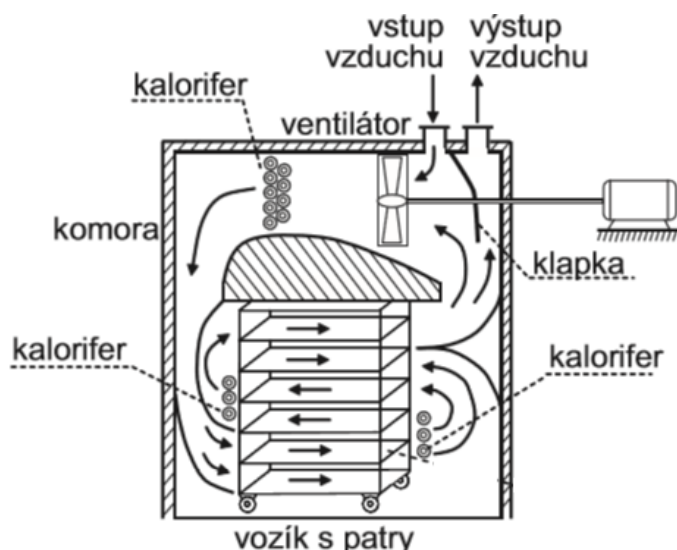
- Kontinuální – Sušárna je v neustálém provozu, sušený materiál je neustále přidáván a odebírán ze sušárny.
- Diskontinuální – Sušící medium protéká sušárnou kontinuálně, ale je nutné mechanicky měnit materiál po vysušení.

## 4.2 Konvekční sušárny

Jedná se o sušárny s přímým způsobem sušení. Přenos tepla i hmoty je zajištěn sušícím prostředím. U přímého sušení je třeba velkého množství topného média.

### 4.2.1 Komorová sušárna

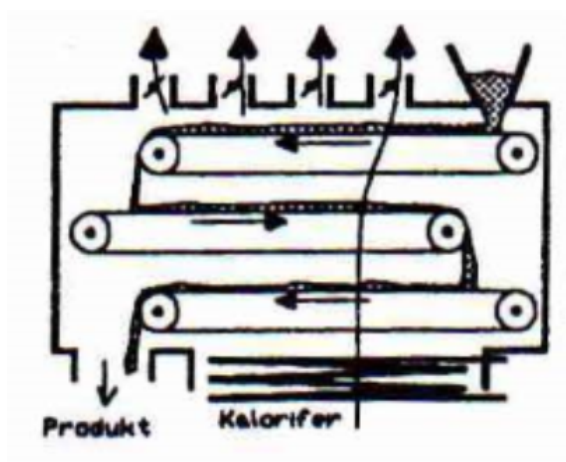
Jedná se o nejjednodušší typ sušárny. Sušárnu tvoří tepelně izolovaná komora (skříň) do které se vkládá vozík, s nad sebou naskládanými policemi na které se vloží tenká vrstva biomasy. Vzduch v sušárně je ohříván kaloriferem, což je tepelný výměník vytápěný parou. Ohříváný vzduch v sušárně je rozváděn ventilátorem. Množství nasávaného a odváděného vzduchu určují klapky, které jsou umístěny na vstupu do oběhu vzduchu a výstupu, což ovlivňuje rychlost sušení. U sušáren tohoto typu sušení probíhá rovnoměrně, nicméně sušárny mají malou kapacitu a doba sušení je dlouhá, sušárny mají malý odpařovací výkon, okolo 1 kg/m<sup>2</sup>.h a na odpaření 1 kg vody je potřeba cca 3 kg páry. Teplota sušení bývá od 105°C do 300°C. Komorové sušárny mají periodický provoz a jsou vhodné pro sušení všech druhů dřevin a látek kde převládá vnitřní difuzní odpor např. ovoce, zelenina, a maso.



Obr. 4.1 Komorová sušárna [5]

### 4.2.2 Pásová sušárna

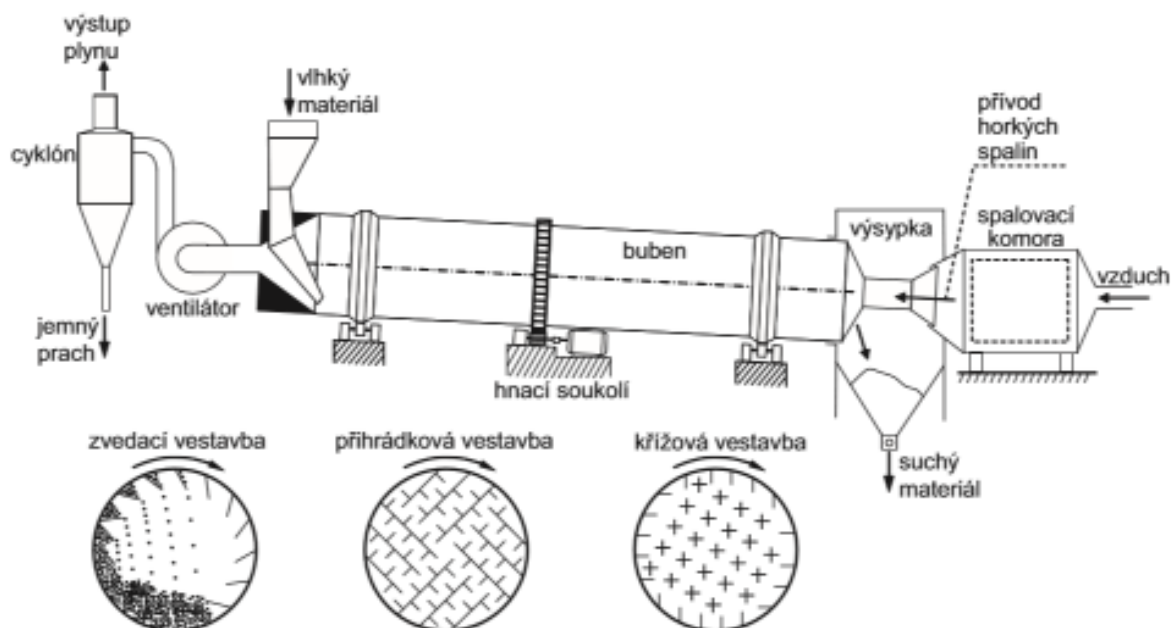
Sušárny tohoto typu se skládají ze, 3 až 7 pod sebou umístěných pásových dopravníků, jejichž pásy se vždy navzájem pohybují v opačném směru. Mokrý biomasa se nasype na horní dopravník tak, aby neutvořila příliš vysokou vrstvu, biomasa putuje po pásu a na konci spadne na další pás položený níže, zatímco se promíchá a obrátí. Tento proces se opakuje do doby, kdy biomasa spadne z nejnižší položeného pásu, kde opouští sušárnu. Nad pásy putuje ohřátý vzduch, který suší biomasu. Existují i pásové sušárny s jediným pásovým dopravníkem, který je uzavřen v izolovaném tunelu, kde horký vzduch proudí nad biomasou. Teplota sušení bývá od 80°C do 150°C. Provoz pásových sušáren je kontinuální. Odpařovací výkon bývá od 10 do 100 kg/m<sup>2</sup>.h a spotřeba tepla 4-5 MJ/kg sušeného materiálu. Pásové sušárny mívají dlouhou dobu sušení a zpracovávají materiály s vysokou počáteční vlhkostí jako je např. dřevní štěpka nebo kůra, jsou taky určeny pro sušení ovoce, zeleniny nebo dřevní hmoty, která se následně zpracovává na dřevní pelety.



Obr. 4.2 Pásová sušárna se 3 pásy [3]

#### 4.2.3 Bubnová sušárna

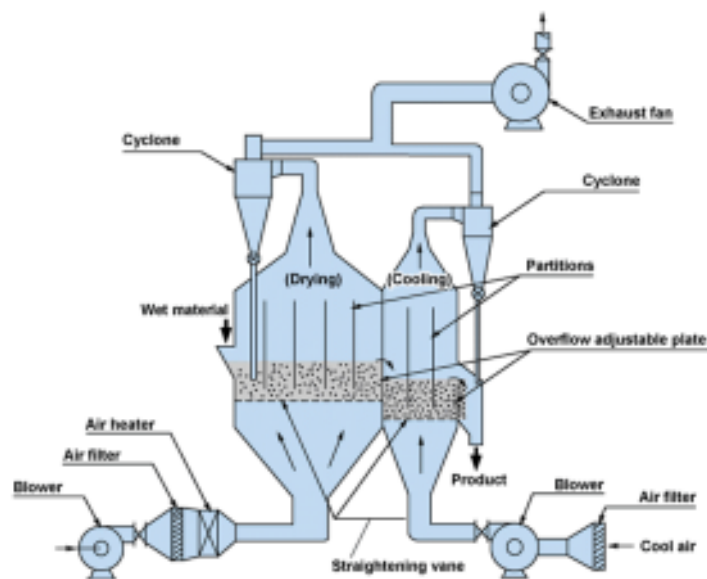
Bubnová sušárna představuje mírně nakloněný buben (válec) který může být dlouhý od 1 až do 15 metrů, o průměru od 1 do 3 metrů. Buben rotuje kolem své osy rychlostí zhruba od 1 do 8 otáček za minutu. Většina bubnových sušáren je opatřena vestavbami, které zvyšují kontaktní plochu se sušícím médiem a také pomáhají biomase promíchávat. Biomasa je vspávána do horní části bubnu tak aby zaplnila zhruba 1/5 objemu válce. Sušárna může být zahřívána přímo zevnitř horkým vzduchem nebo spalinami v souproudém i protiproudovém provedení, anebo nepřímo z venku, přes plášť bubnu, pokud nechceme např. materiál znečistit. Provoz bubnových sušáren je kontinuální. Rozsah teplot sušení může dosahovat až 500°C. Odpařovací výkon se vztahuje na jednotku objemu bubnu, bývá od 10 až do 100 kg/m<sup>3</sup>.h. Spotřeba tepla bývá od 4 do 8 MJ/kg, vhodné pro polydisperzní materiály s delší dobou zdržení v sušárně, krystalické i drobné kusové materiály.



Obr. 4.3 Bubnová sušárna s třemi možnostmi vestavby bubnu [5]

#### 4.2.4 Fluidní sušárna

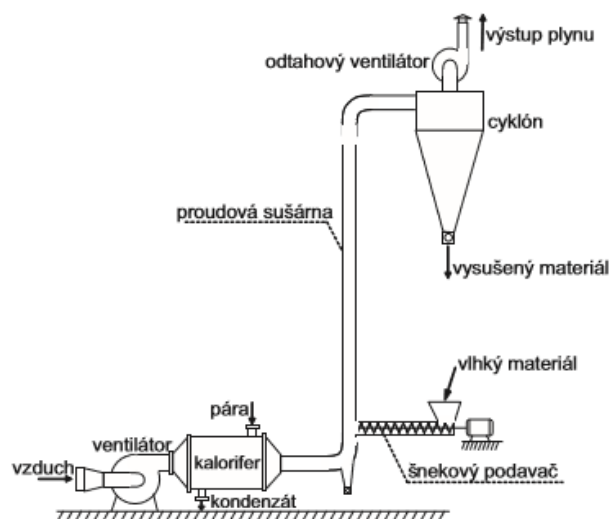
Fluidní sušárna je aparát, ve kterém horký vzduch o teplotě 100 až 200°C prochází objemem sušené biomasy. Biomasa se vpravuje na děrovaný rošt (fluidní lože), který je mírně skloněný a může se mechanicky vertikálně pohybovat. Horký vzduch proudící v určitém množství skrz děrovaný rošt způsobí fluidizaci (vznos) biomasy tak aby se částice navzájem nedotýkaly a nebyly unášeny proudem plynu ze sušárny. Vzhledem k tomu, že se částice biomasy ve vznosu nedotýkají, nedochází k degradaci částic. Ve fluidním stavu jsou částice ve velkém kontaktu se sušícím médiem a tak dochází k intenzivnímu přestupu tepla mezi biomasou a médiem, proto je sušení rychlejší a s vyšší účinností než u předchozích typů sušáren. Vzduch, který ohřívá biomasu, je následně veden do cyklonu k odstranění jemných částic a poté odchází do atmosféry. Provoz fluidních sušáren bývá kontinuální. Spotřeba tepla bývá od 3 do 4 MJ/kg sušeného materiálu s odpařovacím výkonem okolo 100 kg/m<sup>3</sup>.h. Fluidní sušárny jsou vhodné spíše pro monodisperzní jemně až středně zrnité materiály.



Obr. 4.4 Schéma fluidní sušárny [15]

#### 4.2.5 Proudová sušárna

Proudová, nebo také pneumatická sušárna je zařízení, do kterého se biomasa nakládá např. šnekovým podavačem a následně unášena spalínami nebo horkým vzduchem, sušící medium suší a zároveň dopravuje biomasu. Biomasa je dopravována potrubím, které je 10 až 20 metrů dlouhé o rychlostech sušícího media 10 až 40 m/s. Těžké částice, které není schopno sušící medium unést, padají do mlýna pod šnekovým podavačem, kde jsou rozemlety a dále vneseny proudícím vzduchem do potrubí. Rychlost sušícího media musí být větší, než pádová rychlost částic. Suché částice jsou oddělovány v cyklonu, popřípadě ve filtru za cyklonem. Během sušení je materiál značně degradován. Pobyť biomasy v proudu plynu je krátký cca 10 sekund, proto se stihne z materiálu vypařit pouze volná voda. Sušárna je vhodná pro práškovité, zrnité nebo vláknité materiály, které nejsou citlivé na mechanické poškození a mají malou abrazivitu. Provoz sušárny je kontinuální s odpařovacím výkonem 5 až 300 kg/m<sup>3</sup>.h a se spotřebou tepla 3,5 až 9 MJ/kg.



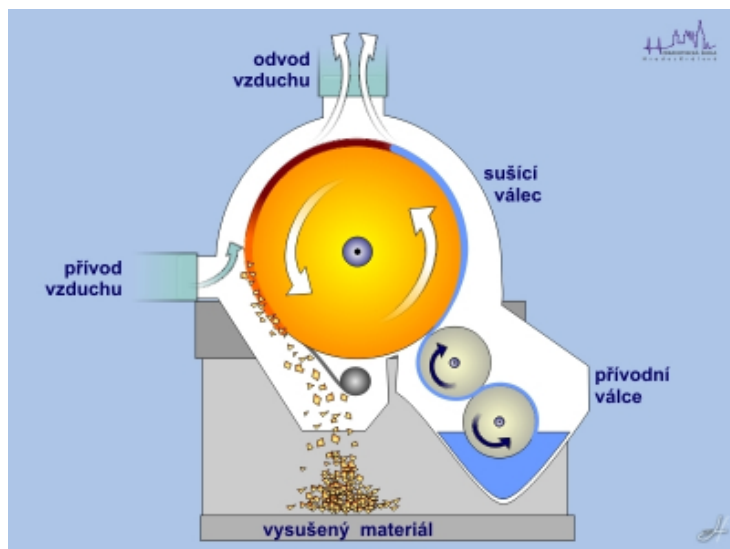
Obr. 4.5 Schéma proudové sušárny [5]

#### 4.3 Kondukční sušárny

Úkolem sušícího media je pouze odvádět vlhkost. Teplosměnným mediem je povětšinou přehřátá pára nebo voda.

##### 4.3.1 Válcová sušárna

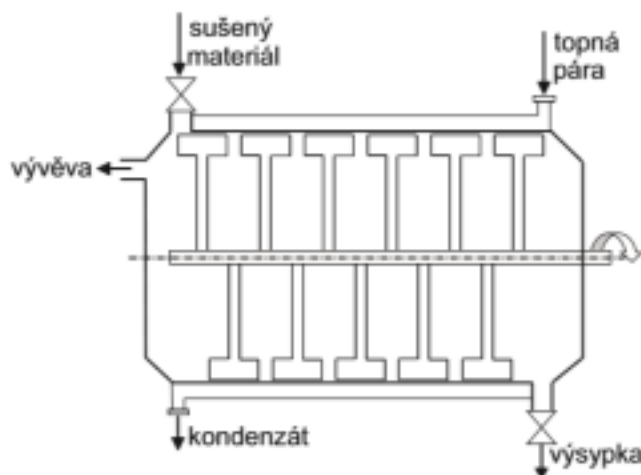
Sušený materiál se nanáší v tloušťce do 1 mm rozstřikováním, nebo pomocí nanášecích válečků na ohříváný buben, který se otáčí rychlostmi 2 – 8 otáček za minutu. Materiál je na bubnu udržován válečky a je vysušen během 2 – 10 sekund a poté je seškrabován do zásobníku mechanickou škrabkou. Sušárna může být i ve dvouválcovém provedení, kde je materiál vnášen do prostoru mezi oba bubny. Sušárna je energeticky méně náročná se spotřebou tepla od 2,9 do 5,7 MJ/kg. Odpařovací výkon bývá, od 7 do 30 kg/m<sup>2</sup>.h a sušárna je v periodickém provozu, vhodná pouze pro pastovité látky.



Obr. 4. 6 Schéma válcové sušárny [14]

#### 4.3.2 Lopatková sušárna

Lopatková sušárna je horizontální žlab, který je vyplněn lopatkovým míchadlem. Materiál je promícháván míchadlem, které má dobrý kontakt s vyhřívaným pláštěm sušárny. V některých provedeních bývá zahříváno i míchadlo. Uvnitř sušárny bývá podtlak, nebo vakuum. Sušárna je vhodná pro hrudkovité i obtížně míchatelné materiály, škroby nebo práškovité kovy. Sušárna je pouze v periodickém provozu se spotřebou tepla od 2,9 do 4,2 MJ/kg sušeného materiálu a odpařovacím výkonem od 10 do 15 MJ/m<sup>2</sup>.h.



Obr. 4.7 Schéma lopatkové sušky [5]

#### 4.3.3 Bubnová sušárna

Je sušárna s konstrukčně podobným uspořádáním jako konvektivní bubnová sušárna viz kapitola výše s rozdílem, že bubnem jsou vedeny trubky, které jsou zahřívány zevnitř např. parou. U kondukční bubnové sušárny bývá spotřeba tepla 3,8 až 6,3 MJ/kg.

#### 4.4 Radiační sušárny

Hlavními představiteli radiačních sušáren jsou sušárny s dielektrickým ohřevem, sušárny s infračerveným ohřevem a mikrovlnné sušárny.

#### 4.4.1 Sušárna s dielektrickým ohřevem

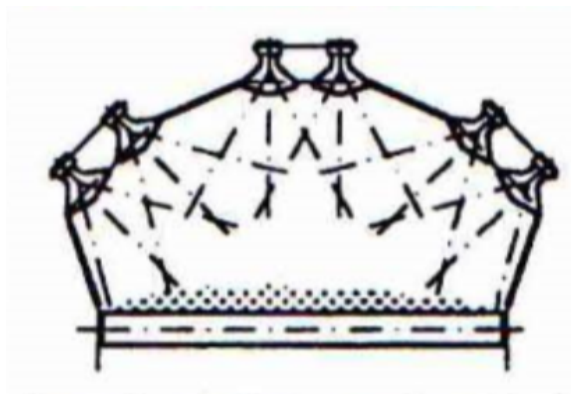
Metodou dielektrického ohřevu lze sušit pouze elektricky nevodivé látky. Sušárna funguje na principu ohřevu dielektrickým vysokofrekvenčním elektromagnetickým polem. Biomasa je ohřívána tepelnou energií, která vznikla díky elektrickým ztrátám uvnitř této látky. V sušárně s dielektrickým ohřevem je sušená biomasa dopravována pásovým dopravníkem, který prochází mezi dvěma elektrodami, které vytváří ono vysokofrekvenční pole. Rychlým přepolarizováním částic uvnitř biomasy vznikají třecí ztráty, které se projevují teplem. Frekvence elektromagnetického pole bývá od 1 do 200 MHz. Sušárna může být v kontinuálním i v periodickém provedení se spotřebou energie okolo 3 MJ/kg a sušárna je vhodná pro sušení dřeva, papíru nebo plastů.



Obr. 4.8 Schéma dielektrické sušárny [3]

#### 4.4.2 Sušárna s infračerveným ohřevem

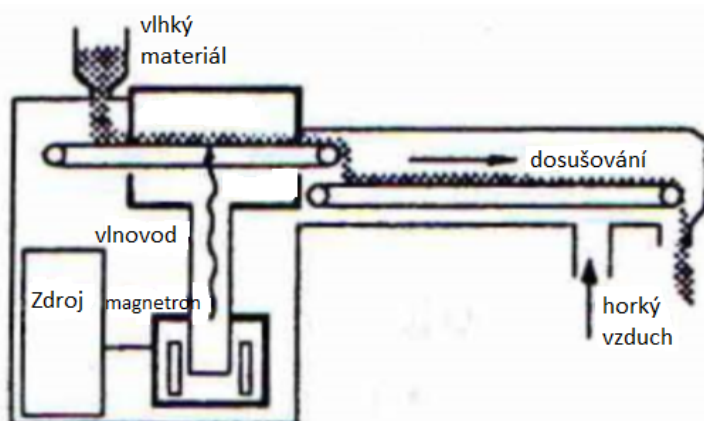
K přenosu sálavé energie dochází u sušáren s infračerveným ohřevem žárovkami, topnými tělísky, nebo pórznými keramickými deskami které jsou ohřívány plynem. Poslední uvedená metoda má navíc výhodu konvekčního vytápění. Hlavní použití pro sušení nátěrů, papíru, ovoce, zeleniny, kakaových bobů, nebo zrní. Odpařovací výkon bývá okolo 35 kg/m<sup>2</sup>·h.



Obr. 4.9 Schéma infračervené sušárny [3]

#### 4.4.3 Mikrovlnná sušárna

Mikrovlnné sušárny fungují na podobném principu jako sušárny s dielektrickým ohřevem. Jedná se o nejefektivnější, ale zároveň nejdražší způsob sušení materiálu. Mikrovlny jsou generované magnetronem, podobně jako tomu je u mikrovlnné trouby. Frekvence vln se pohybuje od 900 do 2450 MHz. Mikrovlnné sušárny se používají hlavně na dosušování materiálu (vlhkost materiálu pod 20%), vhodné pro potravinářské látky, papír, kůži, dřevo, nebo i pro textilie a léky.



Obr. 4.10 Schéma mikrovlnné sušárny s dosušováním konvekcí [3]

#### 4.5 Porovnání sušáren

Srovnání sušáren s konvekčním a kondukčním sušením

Tabulka 4.1 Porovnání sušáren

	<b>Konvekční sušárny</b>	<b>Kondukční sušárny</b>
Cena	Vysoká	Vyšší pořizovací cena, obtížné pro návrh, výrobu a údržbu
Náklady na vypaření vody a produkci	Vyšší než u kondukčních sušáren	Nižší náklady na produkci, náklady na vysušení se odvíjí od teplosměnné plochy
Energetická účinnost	Velká ztráta díky výstupu plynu	Vyšší energetická účinnost díky redukci výstupu plynu
Povoz ve vakuu	Není možný	Umožňují provoz ve vakuu, ideální pro tepelně citlivé materiály
Prašnost	Vysoká	Nízká
Nebezpečí kontaminace	Přetrvává	Vyloučeno, díky tomu, že teplonosné medium, nepříjde ke kontaktu se sušeným materiálem
Nosný plyn	Používají určité množství teplonosného plynu, který přináší teplo nutné k vypaření kapaliny	Malé nebo žádné množství nosného plynu je třeba k odstranění par uvolněných z látky

## 5 Bilanční výpočet bubnové sušárny

Cílem této kapitoly je určit tepelnou bilanci bubnové sušárny, ve které se suší dřevní štěpka rychlostí 20 kg/hod o počáteční vlhkosti 70% na konečnou vlhkost 15%. Dále je třeba určit množství a vlastnosti spalin, které vznikly po spálení smrkového dřeva o vlhkosti 15% za přebytku vzduchu  $\alpha = 1,5$  a které suší dřevní štěpku. Na konci kotle mají spaliny teplotu 200 °C a na vstupu do sušárny teplotu 95 °C. V poslední části je třeba spočítat, zda vstupní rozměry sušárny (délka 3 m a průměr 0,6 m) vyhovují sušárně o těchto parametrech.

### 5.1 Bilance sušené biomasy

#### Dané hodnoty

Počáteční vlhkost sušené hmoty	$X_{A0} = 0,7$
Konečná vlhkost sušené hmoty	$X_{A1} = 0,15$
Množství vysušeného materiálu	$\dot{m}_c = 20 \text{ kg/hod}$

#### Množství vody ve vysušeném materiálu

$$\dot{m}_{1w} = \dot{m}_c \cdot X_{A1} \text{ [kg/hod]} \quad (5.1)$$

$$\dot{m}_{1w} = 20 \cdot 0,15 = 3 \text{ kg/hod} \quad (5.2)$$

#### Množství sušiny v materiálu

$$\dot{m}_{1A} = \dot{m}_c \cdot (1 - X_{A0}) = \dot{m}_c - \dot{m}_{1w} \text{ [kg/hod]} \quad (5.3)$$

$$\dot{m}_{1A} = 20 \cdot (1 - 0,7) = 6 \text{ kg/hod} \quad (5.4)$$

#### Množství vlhkého materiálu

$$\dot{m}_{0A} = \dot{m}_c \cdot \frac{1 - X_{A1}}{1 - X_{A0}} \text{ [kg/hod]} \quad (5.5)$$

$$\dot{m}_{0A} = 20 \cdot \frac{1 - 0,15}{1 - 0,7} = 56,67 \text{ kg/hod} \quad (5.6)$$

#### Množství vody v sušeném materiálu

$$\dot{m}_{0w} = \dot{m}_{0A} - \dot{m}_{1A} \text{ [kg/hod]} \quad (5.7)$$

$$\dot{m}_{0w} = 56,67 - 6 = 50,67 \text{ kg/hod} \quad (5.8)$$

#### Množství odpařené vody během sušení

$$\dot{m}_w = \dot{m}_{0A} - \dot{m}_c \text{ [kg/hod]} \quad (5.9)$$

$$\dot{m}_w = 56,67 - 20 = 36,67 \text{ kg/hod} \quad (5.10)$$

## 5.2 Tepelná bilance sušárny

### Dané hodnoty a konstanty

Měrná tepelná kapacita vody	$c_v = 4200 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
Měrné výparné teplo vody	$r = 2255 \text{ kJ/kg}$
Počáteční teplota sušené hmoty	$t_{0A} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
Teplota spalin na výstupu ze sušárny	$t_{S1} = 95 \text{ }^\circ\text{C}$

### Teplo potřebné k ohřevu vody

$$Q_{Ov} = c_v \cdot \Delta t \cdot \dot{m}_w = c_v \cdot (t_{S1} - t_{0A}) \cdot \dot{m}_w \text{ [J]} \quad (5.11)$$

$$Q_{Ov} = 4200 \cdot (95 - 20) \cdot 36,67 = 11551050 \text{ J} = 11,55 \text{ MJ} \quad (5.12)$$

### Teplo potřebné k odpaření vody

$$Q_{Od} = r \cdot \dot{m}_w \text{ [kJ]} \quad (5.13)$$

$$Q_{Od} = 2255 \cdot 36,67 = 82690,85 \text{ kJ} = 82,69 \text{ MJ} \quad (5.14)$$

### Celkové potřebné teplo

$$Q_c = Q_{Ov} + Q_{Od} \text{ [MJ]} \quad (5.15)$$

$$Q_c = 11,55 + 82,69 = 94,24 \text{ MJ} \quad (5.16)$$

### Tepelný příkon

$$P = \frac{Q_c}{3,6} \text{ [kW]} \quad (5.17)$$

$$P = \frac{94,24}{3,6} = 26,18 \text{ kW} \quad (5.18)$$

## 5.3 Stechiometrie spalin

Spaliny o teplotě 95 °C vzniknou spálením smrkového dřeva o vlhkosti 15%.

Vlastnosti paliva byly vyhledány ze zdroje [10]:

Dřevo – smrk

Obsah vody  $W^r$  - 15 [%]

Obsah uhlíku  $C^r$  – 43,43 [%]

Obsah vodíku  $H_2^r$  – 4,71 [%]

Obsah dusíku  $N_2^r$  – 0,1 [%]

Obsah síry  $S^r$  – 0,01 [%]

Obsah kyslíku  $O_2$  – 35,93 [%]

Obsah popelovin  $A^r$  – 0,82 [%]

Výhřevnost  $Q_i^r$  – 15,65 [MJ/kg]

### 5.3.1 Objem vzduchu

#### Minimální spotřeba kyslíku při dokonalém spálení

$$V_{O_{2min}} = \frac{22,39}{21,01} \cdot C^r + \frac{22,39}{4,032} \cdot H_2^r + \frac{22,39}{32,06} \cdot S^r - \frac{22,39}{32,0} \cdot O_2^r \quad [m_{O_2}^3 / kg_{pal}] \quad (5.19)$$

$$V_{O_{2min}} = \frac{22,39}{21,01} \cdot 0,4343 + \frac{22,39}{4,032} \cdot 0,0471 + \frac{22,39}{32,06} \cdot 0,0001 - \frac{22,39}{32,0} \cdot 0,3593 = 0,473048 \quad m_{O_2}^3 / kg_{pal} \quad (5.20)$$

#### Minimální spotřeba suchého vzduchu

$$V_{V_{min}}^S = \frac{100}{21} \cdot V_{O_{2min}} \quad [m_{vzd}^3 / kg_{pal}] \quad (5.21)$$

$$V_{V_{min}}^S = \frac{100}{21} \cdot 0,473048 = 2,25261 \quad m_{vzd}^3 / kg_{pal} \quad (5.22)$$

#### Minimální spotřeba vlhkého vzduchu

$$V_{V_{min}} = f \cdot V_{V_{min}}^S \quad [m_{vzd}^3 / kg_{pal}] \quad (5.23)$$

Kde  $f$  je faktor poměrného suchého vzduchu o objem vodní páry, který se pohybuje v rozmezí 1,01 – 1,05. U běžných výpočtů je faktor  $f$  volen  $f = 1,024$ .

$$V_{V_{min}} = 1,024 \cdot 2,25261 = 2,306673 \quad m_{vzd}^3 / kg_{pal} \quad (5.24)$$

### 5.3.2 Složky spalin

#### Objem $N_2$

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28,013} \cdot N_2^r + 0,7805 \cdot V_{V_{min}}^S \quad [m_{N_2}^3 / kg_{pal}] \quad (5.25)$$

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28,013} \cdot 0,001 + 0,7805 \cdot 2,25261 = 1,758949 \quad m_{N_2}^3 / kg_{pal} \quad (5.26)$$

#### Objem $CO_2$

$$V_{CO_2} = \frac{22,27}{12,01} \cdot C^r + 0,0003 \cdot V_{V_{min}}^S \quad [m_{CO_2}^3 / kg_{pal}] \quad (5.27)$$

$$V_{CO_2} = \frac{22,27}{12,01} \cdot 0,4343 + 0,0003 \cdot 2,25261 = 0,805993 \quad m_{CO_2}^3 / kg_{pal} \quad (5.28)$$

### Objem SO<sub>2</sub>

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S^r [m_{SO_2}^3/kg_{pal}] \quad (5.29)$$

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot 0,0001 = 6,82782 \cdot 10^{-5} m_{SO_2}^3/kg_{pal} \quad (5.30)$$

### Objem Ar

$$V_{Ar} = 0,0092 \cdot V_{V_{min}}^S [m_{Ar}^3/kg_{pal}] \quad (5.31)$$

$$V_{Ar} = 0,0092 \cdot 2,25261 = 0,020724 m_{Ar}^3/kg_{pal} \quad (5.32)$$

### Minimální množství suchých spalin bez přebytku vzduchu

$$V_{sp_{min}}^S = V_{CO_2} + V_{N_2} + V_{SO_2} + V_{Ar} [m_{spal}^3/kg_{pal}] \quad (5.33)$$

$$V_{sp_{min}}^S = 0,085993 + 1,758949 + 6,82782 \cdot 10^{-5} + 0,020724 = 2,585734 m_{spal}^3/kg_{pal} \quad (5.34)$$

### Minimální objem vody ve spalinách

$$V_{H_2O_{min}} = \frac{44,81}{4,032} \cdot H_2^r + \frac{22,41}{18,015} \cdot W^r + (f - 1) \cdot V_{V_{min}}^S [m_{H_2O}^3/kg_{pal}] \quad (5.35)$$

$$V_{H_2O_{min}} = \frac{44,81}{4,032} \cdot 0,0471 + \frac{22,41}{18,015} \cdot 0,15 + (1,024 - 1) \cdot 2,25261 = 0,764107 m_{H_2O}^3/kg_{pal} \quad (5.36)$$

### Minimální množství vlhkých spalin bez přebytku vzduchu

$$V_{sp_{min}} = V_{sp_{min}}^S + V_{H_2O_{min}} [m^3/kg_{pal}] \quad (5.37)$$

$$V_{sp_{min}} = 2,585734 + 0,764107 = 3,349842 m^3/kg_{pal} \quad (5.38)$$

### Objemový podíl CO<sub>2</sub> ve spalinách bez přebytku vzduchu

$$r_{CO_2} = \frac{V_{CO_2} + V_{SO_2}}{V_{sp_{min}}} [-] \quad (5.39)$$

$$r_{CO_2} = \frac{0,085993 + 6,82782 \cdot 10^{-5}}{3,349842} = 0,240627 \quad (5.40)$$

### Objemový podíl H<sub>2</sub>O ve spalinách bez přebytku vzduchu

$$r_{H_2O} = \frac{V_{H_2Omin}}{V_{spmin}} [-] \quad (5.41)$$

$$r_{H_2O} = \frac{0,764107}{3,349842} = 0,228103 \quad (5.42)$$

### Objemový podíl tří – atomových plynů při spalování bez přebytku vzduchu

$$r_{sp} = r_{H_2O} + r_{CO_2} [-] \quad (5.43)$$

$$r_{sp} = 0,228103 + 0,240627 = 0,468729 \quad (5.44)$$

### Skutečný objem vzduchu (výpočty pro $\alpha = 1,5$ )

$$V_{SK} = V_{Vmin} \cdot \alpha [m_{vzd}^3/kg_{pal}] \quad (5.45)$$

$$V_{SK} = 2,306673 \cdot 1,5 = 3,460009 m_{vzd}^3/kg_{pal} \quad (5.46)$$

### Skutečný objem vlhkých spalin

$$V_{spal} = V_{spmin} + (\alpha - 1) \cdot V_{Vmin} [m_{spal}^3/kg_{pal}] \quad (5.47)$$

$$V_{spal} = 3,349842 + (1,5 - 1) \cdot 2,306673 = 4,503178 m_{spal}^3/kg_{pal} \quad (5.48)$$

### Skutečné množství vodní páry ve spalinách

$$V_{H_2O} = V_{H_2Omin} + (f - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot V_{Vmin}^S [m_{H_2O}^3/kg_{pal}] \quad (5.49)$$

$$V_{H_2O} = 0,764107 + (1,024 - 1) \cdot (1,5 - 1) \cdot 2,25261 = 0,791139 m_{H_2O}^3/kg_{pal} \quad (5.50)$$

### Skutečný objemový podíl CO<sub>2</sub> ve spalinách

$$r_{CO_2} = \frac{V_{CO_2} + V_{SO_2}}{V_{spal}} \quad (5.51)$$

$$r_{CO_2} = \frac{0,805993 + 6,82782 \cdot 10^{-5}}{4,503178} = 0,178998 \quad (5.52)$$

### Skutečný objemový podíl H<sub>2</sub>O ve spalínách

$$r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{spal}} \quad (5.53)$$

$$r_{H_2O} = \frac{0,791139}{4,503178} = 0,175685 \quad (5.54)$$

### Skutečný objemový podíl tří – atomových plynů

$$r_{sp} = r_{H_2O} + r_{CO_2} \quad (5.55)$$

$$r_{sp} = 0,175685 + 0,178998 = 0,354683 \quad (5.56)$$

## 5.4 Výpočet množství paliva

Pro určení množství paliva musíme stanovit entalpie spalín při teplotě 200 °C a následně účinnost kotle.

Volíme tabulkovou hodnotou (pro 200 °C).

Tabulka 5.1 Měrné entalpie spalinových složek

t [°C]	i [kJ/kg]						
	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Ar	SO <sub>2</sub>	pop	H <sub>2</sub> O
100	131,7	130,0	170,0	93,07	191,2	80,8	150,5
200	267,0	260,7	357,5	186,0	394,1	169,1	304,5

### 5.4.1 Výpočty entalpií

Pro spaliny o teplotě 200 °C, kde  $X_{pop}$  je podíl popílku k celkové hmotnosti tuhých zbytků (volíme  $X_{pop} = 15\%$ ). A teplotu vzduchu v okolí kotle 30 °C při měrné tepelné kapacitě vzduchu  $c_{vz} = 1,325 \text{ kJ/m}^3 \cdot K$ .

#### Entalpie popílku

$$I_{pop} = i_{pop} \cdot \frac{X_{pop} \cdot A^r}{100} \text{ kJ/kg}_{pal} \quad (5.57)$$

$$I_{pop} = 169,1 \cdot \frac{15 \cdot 0,0082}{100} = 0,2080 \text{ kJ/kg}_{pal} \quad (5.58)$$

### Entalpie spalin při $\alpha = 1$ a $200\text{ }^\circ\text{C}$

$$I_{sp\ min} = V_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + V_{SO_2} \cdot i_{SO_2} + V_{N_2} \cdot i_{N_2} + V_{H_2O\ min} \cdot i_{H_2O\ min} + V_{Ar} \cdot i_{Ar} \quad [kJ/kg_{pal}] \quad (5.59)$$

$$I_{sp\ min} = 0,805993 \cdot 357,5 + 6,82782 \cdot 10^{-5} \cdot 394,1 + 1,758949 \cdot 260,7 + 0,764107 \cdot 304,5 + 0,020724 \cdot 186 = 983,231 \text{ kJ/kg}_{pal} \quad (5.60)$$

### Entalpie vzduchu při $\alpha = 1$ a $30\text{ }^\circ\text{C}$

$$I_{vzd\ min} = V_{Vmin}^s \cdot c_{vz} \cdot t_{vz} \quad [kJ/kg_{pal}] \quad (5.61)$$

$$I_{vzd\ min} = 2,25261 \cdot 1,325 \cdot 30 = 98,541 \text{ kJ/kg}_{pal} \quad (5.62)$$

### Entalpie spalin při $\alpha = 1,5$ a $200\text{ }^\circ\text{C}$

$$I_{sp} = I_{sp\ min} + (\alpha - 1) \cdot I_{vzd\ min} + I_{pop} \quad [kJ/kg_{pal}] \quad (5.63)$$

$$I_{sp} = 983,231 + (1,5 - 1) \cdot 98,541 + 0,2080 = 1032,710 \text{ kJ/kg}_{pal} \quad (5.64)$$

### Entalpie vzduchu při $\alpha = 1,5$

$$I_{vzd} = I_{vzd\ min} \cdot \alpha \quad [kJ/kg_{pal}] \quad (5.65)$$

$$I_{vzd} = 98,541 \cdot 1,5 = 147,812 \text{ kJ/kg}_{pal} \quad (5.66)$$

## 5.4.2 Výpočet ztrát kotle

Jelikož neznáme typ kotle, můžeme pouze stanovit přibližnou účinnost a některé ztráty kotle (např. ztrátu sdílením tepla do okolí, chemický nedopal) zanedbáme pro usnadnění výpočtu.

### Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích (mechanický nedopal)

Pro hodnoty obsahu uhlíku v uvažovaném tuhém zbytku jsou voleny hodnoty pro roštový kotel.[9]

$$(C_s = 13\%, C_r = 28\%, C_p = 15\%, X_s = 65\%, X_r = 2\%, X_p = 15\%)$$

$$\xi_{MN} = \frac{32600 \cdot A^r}{Q_i^r} \cdot \left( \frac{C_s}{1 - C_s} \cdot X_s + \frac{C_r}{1 - C_r} \cdot X_r + \frac{C_p}{1 - C_p} \cdot X_p \right) \quad [-] \quad (5.67)$$

$$\xi_{MN} = \frac{32600 \cdot 0,0082}{15650} \cdot \left( \frac{0,13}{1 - 0,13} \cdot 0,65 + \frac{0,28}{1 - 0,28} \cdot 0,02 + \frac{0,15}{1 - 0,15} \cdot 0,15 \right) = 0,002244 \quad (5.68)$$

#### Ztráta fyzickým teplem (komínová ztráta)

$$\xi_k = (1 - \xi_{MN}) \frac{I_{sp} - I_{vzd}}{Q_i^r} [-] \quad (5.69)$$

$$\xi_k = (1 - 0,002244) \cdot \frac{1032,710 - 147,812}{15650} = 0,056416 \quad (5.70)$$

#### 5.4.3 Výpočet účinnosti kolte nepřímou metodou

$$\eta_k = 1 - \Sigma \xi_i [-] \quad (5.71)$$

$$\eta_k = 1 - \xi_k - \xi_{MN} [-] \quad (5.72)$$

$$\eta_k = 1 - 0,056416 - 0,002244 = 0,941 \quad (5.73)$$

#### 5.4.4 Výpočet množství paliva

$$\dot{m}_{pal} = \frac{P}{Q_i^r \cdot \eta_k} [kg/s] \quad (5.74)$$

$$\dot{m}_{pal} = \frac{26,18}{15650 \cdot 0,941} = 0,001778 \text{ kg/s} \doteq 6,4 \text{ kg/hod} \quad (5.75)$$

#### 5.4.5 Další výpočty sušárny

##### Objemový tok spalin vstupujících do sušárny

$$\dot{V}_{spal} = V_{spal} \cdot \dot{m}_{pal} [m^3/hod] \quad (5.76)$$

$$\dot{V}_{spal} = 4,503178 \cdot 6,4 = 28,820 \text{ m}^3/\text{hod} \quad (5.77)$$

##### Vlhkost spalin vstupujících do sušárny

$$X_{sp} = \frac{V_{H_2O}}{V_{spal}} [-] \quad (5.78)$$

$$X_{sp} = \frac{0,791139}{4,503178} = 0,176 \quad (5.79)$$

### 5.5 Výpočet teoretických rozměrů sušárny

Minimální možné rozměry sušárny při maximální kapacitu sušeného materiálu

$\dot{m}_c = 20 \text{ kg/hod}$ ,  $\psi = 0,2$  kde  $\psi$  je součinitel plnosti bubnu sušárny, bubnové sušárny mívají buben zaplněný z 20 % (viz kapitola 4.2.3). A  $\rho_s$  je hustota dřevní štěrky (volíme běžnou hodnotu  $250 \text{ kg/m}^3$ ).

#### Objem bubnu sušárny

$$V = \frac{\dot{m}_c}{\rho_s \cdot \psi} [m^3] \quad (5.80)$$

$$V = \frac{20}{250 \cdot 0,2} = 0,4 \text{ m}^3 \quad (5.81)$$

#### Průměr bubnu sušárny

$$d = \sqrt[3]{\frac{V}{\pi}} [m] \quad (5.82)$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{0,4}{\pi}} = 0,503 \text{ m} \quad (5.83)$$

#### Délka bubnu sušárny

$$l = 4 \cdot d [m] \quad (5.84)$$

$$l = 4 \cdot 0,503 = 2,012 \text{ m} \quad (5.85)$$

## **ZÁVĚR**

Tato bakalářská práce je rozdělena na dvě části, v první části se zabývá biomasou a teorií sušení pevných látek, dále zde přehledný popis sušáren biomasy. Ve druhé části je proveden bilanční výpočet bubnové sušárny na biomasu. Sušárna má sušící výkon 20 kg/hod, suší dřevní štěpku o počáteční relativní vlhkosti 70 % na konečnou vlhkost 15 %. Dřevní štěpka je sušena spalínami, které vzniknou po spálení smrkového dřeva o relativní vlhkosti 15 %, spaliny za kotlem mají teplotu 200 °C a při vstupu do sušárny suší dřevní štěpku teplotou 95 °C. Po provedení hmotnostních bilancí vyšlo, že je do sušárny potřeba dodávat 56,67 kg/hod vlhké dřevní štěpky. Z energetické bilance jsme se dozvěděli, že na ohřev a odpaření vody je do sušárny třeba dodat teplo o velikosti 94,24 MJ. Dále po určení charakteristiky spalin a účinnosti kotle vyplývá, že do kotle je třeba přidávat palivo rychlostí 6,4 kg/hod aby sušárna splňovala zadané parametry. Spaliny, které vcházejí do sušárny, mají objemový průtok 28,82 m<sup>3</sup>/hod a relativní vlhkost 17,6 %. Po určení minimálních rozměrů, za kterých by sušárna mohla podle daných parametrů fungovat, můžeme konstatovat, že sušárna splňuje dané podmínky. Dřevní štěpka díky vysušení několikanásobně zvětší svou výhřevnost, avšak štěpka není příliš vhodná pro plynulý chod spalování, většinou je třeba další úpravy briketováním, či peletováním abychom zaručili co nejdokonalejší spálení a tím uvolnili co nejvíce tepelné energie.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MIRTINGER, Karel a Jiří BERANOVSKÝ. *Energie z biomasy*. Brno: Computer Press, 2011. Stavíme. ISBN 978-80-251-2916-6.
- [2] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [3] ŠESTÁK, Jiří a Rudolf ŽITNÝ. *Tepelné pochody II: výměníky tepla, odpařování, sušení, průmyslové pece a elektrický ohřev*. Vyd. 2. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-01-03475-5.
- [4] RICHTER, Miroslav a Otakar SÖHNEL. *Průmyslové technologie III: stroje a zařízení chemického průmyslu: [procesy, stroje a zařízení]*. V Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně, Fakulta životního prostředí, 2012. ISBN 978-80-7414-472-1.
- [5] HASAL, Pavel, Igor SCHREIBER a Dalimil ŠNITA. *Chemické inženýrství I*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2007. ISBN 978-80-7080-629-6.
- [6] BECHNÍK, Bronislav. Biomasa - definice a členění. *Tzb - info* [online]. 2009 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/biomasa/5641-biomasa-definice-a-cleneni>
- [7] VOBOŘIL, David. Biomasa - zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR. In: *O energetice* [online]. 2017 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/biomasa-vyuziti-zpracovani-vyhody-a-nevyhody/>
- [8] CHAPLIN, Martin. Water activity. In: *Lsbu* [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: [http://www1.lsbu.ac.uk/water/water\\_activity.html](http://www1.lsbu.ac.uk/water/water_activity.html)
- [9] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7.
- [10] *Phyllis2 – Database for biomass and waste* [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <https://www.ecn.nl/phyllis2/>
- [11] HORÁK, Jiří, Kamil KRPEC, Lubomír MARTINÍK, Lenka MICHNOVÁ, František HOPAN a Petr KUBESA. Jak si doma stanovit vlhkost a výhřevnost dřeva?. In: *Tzb - info* [online]. 2012 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/9300-jak-si-doma-stanovit-vlhkost-a-vyhrevnost-dreva>
- [12] SCHWARZER, Jan. Teorie vlhkého vzduchu (II). In: *Tzb - info* [online]. 2006 [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/teorie-a-vypocty-vetrani-klimatizace/3353-teorie-vlhkeho-vzduchu-ii>

- [13] VIKTORIN, Zbyněk. Vysoušení bytů a staveb postižených povodněmi. In: *Tzb - info* [online]. 2002 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/1071-vysouseni-bytu-a-staveb-postizenych-povodnemi>
- [14] Sušení. In: *Laboratorní technika* [online]. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <https://lat.zshk.cz/vyuka/suseni.aspx>
- [15] Continuous fluid bed drying system. In: *Kurimoto* [online]. [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <http://www.kurimoto.co.jp/worldwide/en/product/item/07pw/330.php>
- [16] STUDNIČKOVÁ, Renata. Sušení biomasy pro energetické účely. In: *Biom* [online]. 2017 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/suseni-biomasy-pro-energeticke-ucely>
- [17] PARKIH, Dilip M. Solids drying: basics and applications. In: *Chemical engineering* [online]. 2014 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.chemengonline.com/solids-drying-basics-and-applications/?printmode=1>
- [18] *Elektro: Elektrický ohřev – odporový, dielektrický, obloukový, elektronový a laserový*. 2005, **2005**(02).
- [19] GONZALES, Carlos. *Whats difference between conduction convection and radiation* [online]. In: . 2015 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.machinedesign.com/whats-difference-between/what-s-difference-between-conduction-convection-and-radiation>
- [20] UTĚŠIL, Tomislav. Suška na biomasu. In: *Biom* [online]. [cit. 2018-03-01]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/suska-na-biomasu>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
$W^r$	Voda zastoupená v palivu	[-]
$A^r$	Popelovina zastoupená v palivu	[-]
$h$	Hořlavina	[-]
$Q_i^r$	Výhřevnost	[MJ/kg]
$Q_s$	Spalné teplo	[MJ/kg]
$r$	Měrné výparné teplo vody	[kJ/kg]
$w_e$	Vlhkost v energetice	[%]
$w_d$	Vlhkost ve dřevozpracujícím průmyslu	[%]
$X_A$	Měrná vlhkost	[-]
$\varphi$	Relativní vlhkost	[-]
$h$	Entalpie	[kJ/kg]
$T_{dp}$	Teplota rosného bodu	[K]
$T_{wb}$	Teplota mokrého teploměru	[K]
$\dot{M}_A$	Hmotnostní tok sušeného materiálu	[kg/s]
$X_{A0}$	Počáteční relativní vlhkost sušeného materiálu	[-]
$X_{A1}$	Konečná relativní vlhkost sušeného materiálu	[-]
$\dot{M}_S$	Hmotnostní tok sušícího media	[kg/s]
$X_{S0}$	Počáteční relativní vlhkost sušícího media	[-]
$X_{S1}$	Konečná relativní vlhkost sušícího media	[-]
$\dot{W}$	Hmotnostní tok usušeného materiálu	[kg/s]
$h_{A0}$	Počáteční entalpie sušeného materiálu	[kJ/kg]
$h_{A1}$	Konečná entalpie sušeného materiálu	[kJ/kg]
$h_{S0}$	Počáteční entalpie sušícího media	[kJ/kg]
$h_{S1}$	Konečná entalpie sušícího media	[kJ/kg]
$\dot{Q}$	Tepelný výkon	[W]
$\dot{m}_c$	Množství vysušeného materiálu	[kg/hod]
$\dot{m}_{1A}$	Průtok sušiny materiálu	[kg/hod]
$\dot{m}_{0A}$	Průtok vlhkého materiálu	[kg/hod]
$\dot{m}_{0w}$	Hmotnostní průtok vody z materiálu	[kg/hod]
$\dot{m}_w$	Průtok odpařené vody z materiálu	[kg/hod]
$c_v$	Měrná tepelná kapacita vody	[kJ/kg · K]
$t_{0A}$	Počáteční teplota sušené hmoty	[°C]
$t_{S1}$	Teplota spalin na výstupu ze sušárny	[°C]
$Q_{ov}$	Teplo potřebné pro ohřev vody	[J]
$Q_{od}$	Teplo potřebné pro odpaření vody	[J]
$Q_c$	Celkové potřebné teplo	[J]
$P$	Tepelný příkon	[kW]

$V_{O_2min}$	Minimální objem kyslíku	$[m^3/kg]$
$V_{Vmin}^S$	Minimální objem suchého vzduchu	$[m^3/kg]$
$V_{Vmin}$	Minimální objem vlhkého vzduchu	$[m^3/kg]$
$f$	Faktor poměrného suchého vzduchu	$[-]$
$V_{N_2}$	Objem dusíku ve spalinách	$[m^3/kg]$
$V_{CO_2}$	Objem oxidu uhličitého ve spalinách	$[m^3/kg]$
$V_{SO_2}$	Objem oxidu siřičitého ve spalinách	$[m^3/kg]$
$V_{Ar}$	Objem argonu ve spalinách	$[m^3/kg]$
$V_{spmin}^S$	Minimální objem suchých spalin	$[m^3/kg]$
$V_{H_2Omin}$	Minimální objem vody ve spalinách	$[m^3/kg]$
$V_{spmin}$	Minimální objem vlhkých spalin	$[m^3/kg]$
$r_{CO_2}$	Poměrový objem oxidu uhličitého ve spalinách	$[-]$
$r_{H_2O}$	Poměrový objem vody ve spalinách	$[-]$
$r_{sp}$	Poměrový objem tří – atomových prvků ve spalinách	$[-]$
$\alpha$	Součinitel přebytku vzduchu	$[-]$
$V_{SK}$	Skutečný objem suchého vzduchu	$[m^3/kg]$
$V_{spal}$	Skutečný objem vlhkých spalin	$[m^3/kg]$
$V_{H_2O}$	Skutečný objem vodních par ve spalinách	$[m^3/kg]$
$V$	Teoretický objem bubnu sušárny	$[m^3]$
$\rho_s$	Hustota dřevní štěpky	$[kg/m^3]$
$\psi$	Součinitel plnosti bubnu sušárny	$[-]$
$d$	Průměr bubnu sušárny	$[m]$
$l$	Délka bubnu sušárny	$[m]$
$X_{pop}$	Podíl popílku v celkové hmotnosti	$[-]$
$I_{pop}$	Tepelný obsah popílku obsaženého ve spalinách	$[kJ/kg]$
$i_{pop}$	Měrná entalpie popílku	$[kJ/kg]$
$I_{spmin}$	Minimální tepelný obsah spalin	$[kJ/kg]$
$i_{CO_2}$	Měrná entalpie složky CO <sub>2</sub> ve spalinách	$[kJ/kg]$
$I_{vzdmin}$	Minimální tepelný obsah vzduchu	$[kJ/kg]$
$i_{SO_2}$	Měrná entalpie složky SO <sub>2</sub> ve spalinách	$[kJ/kg]$
$i_{N_2}$	Měrná entalpie složky N <sub>2</sub> ve spalinách	$[kJ/kg]$
$i_{H_2Omin}$	Měrná entalpie složky H <sub>2</sub> O ve spalinách	$[kJ/kg]$
$i_{Ar}$	Měrná entalpie složky Ar ve spalinách	$[kJ/kg]$
$c_{vz}$	Měrná tepelná kapacita vzduchu	$[kJ/m^3 \cdot K]$
$t_{vz}$	Teplota vzduchu	$[^\circ C]$
$I_{sp}$	Skutečný tepelný obsah spalin	$[kJ/kg]$
$I_{vzd}$	Skutečný tepelný obsah vzduchu	$[kJ/kg]$

$C_s$	Obsah uhlíku ve škváře	[–]
$C_r$	Obsah uhlíku v propadu	[–]
$C_p$	Obsah uhlíku v popílku	[–]
$X_s$	Poměr hmotnosti popele v škváře	[kg/kg]
$X_r$	Poměr hmotnosti popele v propadu	[kg/kg]
$X_p$	Poměr hmotnosti popele v popílku	[kg/kg]
$\xi_{MN}$	Mechanický nedopal	[–]
$\xi_k$	Komínová ztráta	[–]
$\eta_k$	Celková účinnost kotle	[–]
$\dot{m}_{pal}$	Hmotnostní průtok paliva	[kg/hod]
$\dot{V}_{spal}$	Objemový průtok spalin	[m <sup>3</sup> /hod]
$X_{SP}$	Vlhkost spalin	[–]

## **SEZNAM OBRÁZKŮ**

- Obr. 1.1 Závislost výhřevnosti na vlhkosti biomasy [1]
- Obr. 1.2 Snižování vlhkosti pasivním sušením [14]
- Obr. 2.1 Sorpční izoterma [8]
- Obr. 2.2 Mollierův diagram [12]
- Obr. 2.3 Bilance sušárny [3]
- Obr. 2.4 Průběh sušení [13]
- Obr. 3.1 Schéma sušení z povrchu a) a z objemu b) [4]
- Obr. 3.2 Schéma kondukčního sušení [4]
- Obr. 4.1 Komorová sušárna [5]
- Obr. 4.2 Pásová sušárna se třemi pásy [3]
- Obr. 4.3 Bubnová sušárna se třemi možnostmi vestavby bubnu [5]
- Obr. 4.4 Schéma fluidní sušárny [15]
- Obr. 4.5 Schéma proudové sušárny [5]
- Obr. 4.6 Schéma válcové sušárny [14]
- Obr. 4.7 Schéma lopatkové sušky [5]
- Obr. 4.8 Schéma dielektrické sušárny [3]
- Obr. 4.9 Schéma infračervené sušárny [3]
- Obr. 4.10 Schéma mikrovlnné sušárny s dosušováním konvekcí [3]

## **SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1.1 Hrubý rozbor paliva [9]

Tabulka 1.2 Výhřevnost různých druhů biomasy [1]

Tabulka 4.1 Porovnání sušáren

Tabulka 5.1 Měrné entalpie spalinových složek