

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ  
PRÁCE**

**2020**

**ONDŘEJ  
RYBOLA**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Rybola** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **419998**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Energetika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Sušení biomasy v sušárnách s nepřímým otopem**

Název diplomové práce anglicky:

**Biomass drying in indirectly heated dryers**

Pokyny pro vypracování:

Určete zásadní parametry ovlivňující proces kontaktního sušení a vyhodnoťte jejich vliv na návrh a dimenzování kontaktní sušky na biomasu.

Práce bude obsahovat:

1. Zpracování rešerše vhodných způsobů sušení a typů sušek pro biomasu.
2. Teoretický popis přestupu tepla pro kontaktní sušení a určení zásadních parametrů ovlivňujících tento proces.
3. Experimentální určení provozních charakteristik kontaktní sušky na biomasu pro různé podmínky provozu.
4. Návrh sušky pro využití biomasy s vysokým obsahem vody pro zadané parametry provozu a vyhodnocení vlivu změny daných parametrů na návrh a velikost sušky.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

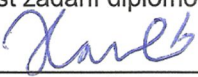
**Ing. Jan Havlík, Ph.D., ústav energetiky FS**

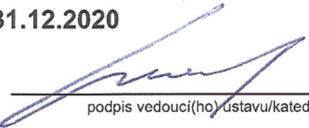
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

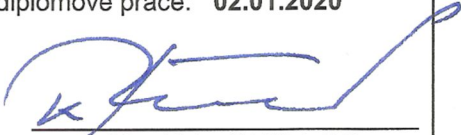
Datum zadání diplomové práce: **30.10.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **02.01.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2020**

  
Ing. Jan Havlík, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

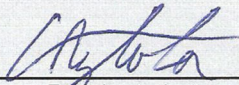
  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

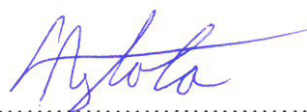
5.11.2019  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

## Čestné prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci *Sušení biomasy v sušárnách s nepřímým otopem* vypracoval samostatně na základě uvedené literatury a konzultací s vedoucím diplomové práce Ing. Janem Havlíkem, Ph.D.

V Praze dne 2. 1. 2020



.....  
Bc. Ondřej Rybala

## Anotační list

---

<b>Jméno autora</b>	Bc. Ondřej Rybola
<b>Název BP/DP</b>	Sušení biomasy v sušárnách s nepřímým otopem
<b>Anglický název:</b>	Biomass drying in indirectly heated dryers
<b>Akademický rok:</b>	2019/2020
<b>Ústav/Odbor:</b>	Ústav energetiky / Energetika
<b>Vedoucí BP/DP:</b>	Ing. Jan Havlík, Ph.D.
<b>Konzultant:</b>	
<b>Bibliografické údaje:</b>	Počet stran: 90 Počet obrázků: 50 Počet tabulek: 18 Počet příloh: 0
<b>Klíčová slova:</b>	Biomasa, dřevní kůra, způsoby sušení, principy sušení, nepřímo otápěné sušárny, návrh sušárny
<b>Keywords:</b>	Biomass, wood bark, drying, drying principles, indirectly heated dryers, dryer design
<b>Anotace:</b>	Práce se zabývá kontaktním sušením. Popisuje vhodné metody sušení a sušárny pro sušení biomasy s vysokým obsahem vody. Teoreticky popisuje proces kontaktního sušení a vliv změny provozních parametrů sušárny na průběh sušení. Součástí práce jsou experimentálně naměřená data získaná měřením na kontaktní sušárně a vyhodnocení naměřených dat. Z teoretických poznatků a z experimentálně zjištěných dat je proveden návrh sušárny dle zadání a následně je vyhodnocen vliv změny provozních parametrů na návrh sušárny.
<b>Abstract:</b>	This thesis describes the contact drying process. It describes suitable methods of drying and dryers for biomass with high content of water. In the theoretical part, the process of contact drying and the influence of changes of operating parameters of a dryer to the drying process are described. As a part of the work, experimentally measured data collected from measuring on an indirectly heated dryer are presented and evaluated. Based on the theoretical knowledge and experimentally determined data, a dryer is designed with respect to the assignment and the effect of a change of the operational parameters on the dryer design is evaluated.

## **Poděkování**

Chtěl bych tímto poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Havlíkovi, PhD. za vedení práce tím správným směrem, za odborné konzultace a cenné rady.

Velký dík patří mé rodině a přátelům, kteří mě podporovali nejen během psaní této práce, ale také po celou dobu studií. Největší poděkování si zaslouží moje zesnulá maminka, která si ze všech nejvíc přála, abych svá studia úspěšně dokončil.

# Obsah

Seznam použitých symbolů .....	8
Úvod .....	10
1. Biomasa .....	11
1.1. Co to je biomasa .....	11
1.2. Dělení biomasy .....	11
1.3. Získávání energie z biomasy .....	13
1.4. Základní vlastnosti palivové biomasy .....	13
1.4.1. Výhřevnost a spalné teplo .....	13
1.4.2. Vlhkost .....	14
1.4.3. Složení paliva .....	16
1.4.4. Další vlastnosti paliva .....	18
1.5. Zpracování biomasy pro energetické účely .....	18
2. Sušení biomasy .....	20
2.1. Význam sušení biomasy .....	20
2.2. Způsoby sušení .....	21
2.2.1. Přírozené (pasivní) sušení .....	21
2.2.2. Umělé (aktivní) sušení .....	22
2.3. Typy tepelných sušáren .....	22
2.3.1. Konvektivní sušení .....	24
2.3.2. Kontaktní sušení .....	27
2.4. Sušky vhodné pro biomasu .....	29
3. Teorie kontaktního sušení .....	30
3.1. Fyzikální popis sušení .....	30
3.2. Parametry sušárny ovlivňující proces sušení .....	37
3.2.1. Rozdíl teplot ( $T_1 - T_2$ ) .....	38
3.2.2. Velikost kontaktní plochy A .....	38

3.2.3.	Součinitel prostupu tepla U .....	38
3.3.	Závěr analýzy parametrů sušárny ovlivňujících proces sušení.....	40
4.	Experimenty provedené na kontaktní sušárně FS ČVUT .....	47
4.1.	Popis měření na kontaktní sušárně ČVUT .....	47
4.2.	Vyhodnocované kombinace parametrů sušárny .....	53
4.3.	Naměřená data a jejich vyhodnocení .....	54
4.4.	Grafy pro srovnání proměnlivých parametrů.....	70
4.5.	Vyhodnocení experimentů .....	73
5.	Návrh sušárny na zadané parametry.....	74
5.1.	Zadání návrhu .....	74
5.2.	Energetická bilance sušárny.....	74
5.3.	Návrh sušárny dle kapitoly 3 – teorie .....	76
5.4.	Návrh sušárny dle kapitoly 4 – experimentální .....	80
5.4.1.	Návrh.....	80
5.4.2.	Změna parametrů.....	82
	Změna teploty otápění.....	82
	Změna zaplnění .....	83
5.4.3.	Hodnocení návrhu sušárny .....	83
6.	Závěr .....	85
	Bibliografie.....	87
	Seznam obrázků.....	89
	Seznam tabulek.....	90

## Seznam použitých symbolů

$Q_i$	kJ/kg	Výhřevnost paliva
$Q_n$	kJ/kg	Spalné teplo paliva
$W$	-	Obsah vody v palivu
$H$	-	Množství vody vzniklé spálením vodíku
$M_v$	kg	Hmotnost mokrého vzorku
$M_s$	kg	Hmotnost suchého vzorku
$h$	-	Obsah hořlaviny v palivu
$A$	-	Obsah popelovin v palivu
$Q$	W	Tepelný tok
$U$	W/m <sup>2</sup> K	Součinitel prostupu tepla
$A$	m <sup>2</sup>	Teplosměnná plocha
$T$	°C, K	Teplota
$\frac{1}{h}$	m <sup>2</sup> K /W	Tepelný odpor
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Hustota
$c$	kJ/kgK	Tepelná kapacita
$\lambda$	W/mK	Tepelná vodivost
$t_R$	s	Doba setrvání lože v sušárně
$\tau$	-	Bezrozměrná doba kontaktu materiálu s teplosměnnou plochou
$t_c$	s	Kritická doba kontaktu materiálu s teplosměnnou plochou
$N_{mix}, N_{therm}$	-	Míchací číslo
$t_{mix}$	-	Časová konstanta míchadla
$Fr$	-	Froudovo číslo
$C$	-	Konstanta pro výpočet $N_{mix}$
$x$	-	Konstanta pro výpočet $N_{mix}$
$D$	m	Průměr bubny, míchadla
$\phi_A$	-	Faktor pokrytí teplosměnné plochy
$h_{fp}$	W/m <sup>2</sup> K	Součinitel prostupu tepla jedinou částicí materiálu
$d$	mm	Rozměr částice
$l$	mm	Modifikovaná střední volná cesta molekul plynu
$\delta$	mm	Drsnost povrchu částic



$h_{rad}$	$W/m^2K$	Příspěvek radiace k přestupu tepla
$\Lambda$		Střední volná cesta molekul plynu
$\gamma$		Accommodation koeficient
R	J/K.mol	Univerzální plynová konstanta
p	Pa	Tlak
M	mol	Molární hmotnost
$\mu$	Pa.s	Dynamická viskozita
$C_{12}$	-	Celkový radiační součinitel
$\sigma$	$W/m^2K^4$	Radiace absolutně černého tělesa
$\varepsilon$	-	Emisivita
m	kg	Hmotnost
L	m	Délka sušárny
S	$m^2$	Otápěná plocha sušárny
V	$m^3$	Objem
$E_{el}$	kWh	Elektrická spotřeba
E	$kJ/h.kg_w$	Energetická hodinová spotřeba na 1 kg odpařené vody v kJ
T	min	Čas, interval sušení
Q	kJ	Energetická spotřeba na 1 sušení
h	$kJ/kgK$	Entalpie
$\dot{m}_{páry}$	$kg_{páry}/h$	Průtok páry, spotřeba páry na 60 minut sušení
n	$min^{-1}$	Otáčky míchadla
l	m	Délka oblouku kruhové úseče
$\alpha$	°	Úhel svírající konce oblouku kruhové úseče

## Úvod

V posledních letech dochází k výraznému posilování podílu obnovitelných zdrojů na výrobě tepla a elektřiny. Důvodem k tomu je upouštění od fosilních paliv kvůli jejich omezené zásobě a také kvůli rostoucímu zájmu o ekologičnost výroby a minimalizaci důsledků na životní prostředí a klima. Hlavními představiteli těchto obnovitelných zdrojů jsou solární a větrné elektrárny. V závěsu za nimi je poté biomasa, která ku příkladu v roce 2018 zaujímala v Německu, které je díky svému Energiewende lídrem v obnovitelných zdrojích, 7,5 % celkové výroby elektřiny, což je více než 6,8 % z plynových zdrojů. [1] [2] [3]

Biomasa je vůbec nejstarším lidským zdrojem energie. Dřevo představovalo až do 18. století prakticky jediný zdroj tepelné energie. S rozvojem průmyslu v 19. století došlo k jeho značnému nahrazení fosilními palivy. Se snahou o snižování vlivu člověka na změnu klimatu nabývá biomasa ke konci 20. století opět na významu, přičemž se již nejedná pouze o využívání dřeva, ale i dalších surovin a produktů označovaných jako biomasa. [3]

Problematické pro energetické využití biomasy je její často vysoký obsah vody. Biomasa s obsahem vody nad 55 % je brána jako nespálitelná. Obecně se doporučuje obsah vody do 30 %, optimálně do 20 %. Voda v palivu způsobuje pokles výhřevnosti a zvětšuje objem spalin. Proto je potřeba pro energetické účely biomasu sušit a snížit tak obsah vody. Sušení je komplikovaný a energeticky náročný proces. [4]

V této práci bude v teoretické části seznámení s rozdělením biomasy, s významem obsahu vody a s metodami sušení a uvedeny vhodné způsoby sušení biomasy. V praktické části bude zjednodušeně popsán princip vedení tepla při sušení v kontaktní sušárně a proveden návrh kontaktní sušárny a praktické zkoušky reálného sušení v experimentální sušárně pro dřevní štěpku.

# 1. Biomasa

## 1.1. Co to je biomasa

Pojem biomasa obecně označuje veškerou organickou hmotu na naší planetě, účastníci se koloběhu živin v biosféře, tedy těla všech organismů – živočichů, rostlin, bakterií, hub a sinic. Základem veškeré živé hmoty je uhlík a jeho chemické vazby, proto je teoreticky možné získat energii ze všech forem biomasy. Ne všechny formy jsou ale považovány za energeticky využitelné. Za využitelné se většinou považují rostliny. [3]

Rostliny odebírají z atmosféry oxid uhličitý a v procesu zvaném fotosyntéza jej pomocí barviva chlorofylu a energie slunečního záření redukují a vytvářejí z něj glukózu a postupně řadu složitých organických sloučenin potřebných ke svému životu. Svou činností a růstem tak de facto akumulují sluneční energii, kterou můžeme uvolnit a využít. Důležité je ale zmínit, že fosilní paliva, která vznikla před dávnými časy stejným procesem, nelze považovat za obnovitelný zdroj. Za ty lze považovat pouze biomasu z geodeticky současné doby. [5]

Velkou předností biomasy je její obnovitelnost a dostupnost. Energeticky využitelnou biomasu tvoří především odpady a cíleně pěstované tzv. energetické plodiny. Při jejich efektivní a zodpovědné přeměně na energii se dá hovořit o energii čisté, neboť spalováním vyprodukované množství oxidu uhličitého přibližně odpovídá množství, které biomasa spotřebuje z atmosféry pro svůj vznik a růst. [2]

Nejvýznamnějším zástupcem biomasy pro ČR je i dnes historicky nejstarší zdroj, dřevní hmota, neboť lesní půda tvoří přibližně 1/3 rozlohy České republiky, a tak se řadí k nadprůměrně zalesněným státům. Dřevní hmota je především domácí surovinou, která je při racionálním využívání trvale obnovitelná, ačkoliv cyklus její obnovy je relativně dlouhodobý, cca 100 let. Další významný podíl v ČR zastupují produkty a zbytky ze zemědělské výroby. [2]

## 1.2. Dělení biomasy

Velmi podrobné rozdělení nalezneme ve vyhlášce č. 477/2012 Sb., která současně udává, jak s biomasou správně nakládat a určuje podmínky pro její státní podporu v energetice spolu se zákonem č. 165/2012 Sb. o podporovaných zdrojích energie. Podle [3] a [5] můžeme obecně rozdělit biomasu následujícím způsobem:

- Energetické plodiny

Takto se označují rostliny, které se pěstují především pro energetické využití. Využit lze každou plodinu, ale praktický význam mají jen plodiny s určitými významnými vlastnostmi:

- dobrá účinnost přeměny oxidu uhličitého na biomasu pomocí slunečního záření, a tedy i vysoká primární produkce; z tohoto hlediska mají výhodu tzv. C4 rostliny;
- velký obsah sušiny v době sklizně;
- vysoká výhřevnost a nízký obsah popela;
- nenáročnost na vody a živiny;
- odolnost proti chorobám a škůdcům.

Jedná se především o rychle rostoucí dřeviny a rostliny bylinného charakteru. Jejich předností je snadný výsev, krátké vegetační období a možnost využití i na neenergetické účely. Řadí se mezi ně:

- rychle rostoucí dřeviny – topol, vrba, olše, akát, líska, platan, ... ;
- rostliny bylinného charakteru – konopí, amaranthus, šťovík, ostřík, kostřava, ... ;
- travní porosty – sloní tráva, chrastice, trvalé travní porosty;
- obiloviny;
- olejnaté rostliny – pro výrobu surových olejů a metylesterů – řepka olejná, slunečnice;
- škrobo-cukernaté rostliny – cukrová řepa, cukrová třtina, brambory.

Seznam schválených rostlin pro energetické využití je uveden např. na [6].

- Odpadní biomasa

Odpadní biomasou je chápána biomasa, která již byla člověkem nějak (jinak než energeticky) využita nebo která slouží primárně k jiným účelům, než je produkce energie.

- z rostlinné výroby – zbytky ze zemědělské prvovýroby a údržby krajiny, odpady ze sadů a vinic, kukuřičná sláma, řepková sláma a veškeré další odpady a zbytky z likvidace křovin
- z živočišné výroby – exkrementy hospodářských zvířat, zbytky z krmiv – hnůj, močůvka, kejda
- z těžby a zpracování dřeva a lesní odpady – větve, kůra, pařezy, kořeny, odřezky, piliny, hobliny

- biologicky rozložitelný komunální odpad (BRKO) – zbytky potravin, papírové obaly
- biologicky rozložitelný průmyslový odpad (BRPO) – odpady z jatek, výroby cukru, mouky, papíru
- splašky z kanalizace

Biomasu lze rozdělit také podle obsahu vody:

- suchá – lze ji spalovat přímo – především dřevo a dřevní odpady, sláma, ...
- vlhká – nelze spalovat přímo, výroba bioplynu – tekuté odpady z živočišné výroby jako je kejda, tekuté komunální odpady, ...
- speciální – olejniny, škrobové a cukernaté plodiny – k získávání energetických látek (bionafta, líh)

V praktické části této práce se budu zabývat sušením dřevný štěpky (kůry), proto se dále v teorii zaměříme hlavně na ni.

### **1.3. Získávání energie z biomasy**

Nejstarší metodou, jak získávat energii z biomasy, je spalování. Jedná se o termochemický proces, při kterém dochází k rozkladu organického materiálu na hořlavé plyny a další látky a následně za přítomnosti vzdušného kyslíku k oxidaci. Výsledkem procesu je vznik oxidu uhličitého, vody, tepla a dalších plynů. Při nedokonalém spalování, tj. za nedostatku spalovacího vzduchu nebo při nízkých teplotách spalování, vzniká řada dalších nežádoucích a často toxických plynů (oxidy dusíku, oxid uhelnatý, polycyklické aromatické uhlovodíky, saze a podobně). [5] [3]

### **1.4. Základní vlastnosti palivové biomasy**

Neboť budeme biomasu používat jako palivo pro spalování, budou nás zajímat vlastnosti jako u fosilních paliv (uhlí, plyn, ...), tedy výhřevnost, obsah vody, složení hořlaviny a další vlastnosti neovlivňující přímo spalovací proces.

#### **1.4.1. Výhřevnost a spalné teplo**

Jedná se o nejvýznamnější parametr každého paliva. Výhřevnost paliva, značena  $Q_i$  s jednotkami zpravidla [kJ/kg], je množství tepla, které se uvolní dokonalým spálením 1 kg hmoty a odvodem vypařené vody se spalinami. Jsou-li spaliny ochlazeny a dojde ke kondenzaci vodní páry a tím odevzdání výparného tepla, dojde k navýšení výhřevnosti o toto teplo,

a pak mluvíme o spalném teple  $Q_n$ . V praxi spalování v kotlích se berou v úvahu pouze výhřevnost a odvod nekondenzované páry se spalinami. [2]

Vztah mezi výhřevností a spalným teplem je

$$Q_n = Q_i + (w + 9H) * 2453,5,$$

kde první člen závorky vyjadřuje množství vody v palivu, druhý množství vody vzniklé spálením vodíku. 2435,5 je výparné teplo vody za normálních podmínek.

Z uvedeného je zřejmé, že výhřevnost paliva, tedy získatelné teplo, je parametr silně závislý na obsahu vody v palivu. Obecně se pro biomasu uvádí výhřevnost 15-19 [MJ/kg]. [5]

V následující tabulce podle [7] si uvedeme několik běžných zástupců biomasy a jejich výhřevnost při 0% obsahu vody, tedy jejich spalné teplo.

*Tabulka 1.4.1-1 - Výhřevnost různých druhů biomasy*

Plodina (100% sušina)	Výhřevnost [MJ/kg]
Amanathus	16,6
Konopí seté	18,06
Koriandr – celá rostlina	18,88
Křídlatka	19,44
Len – sláma	18,58
Lnička	18,84
Řepka ozimá	16,24
Súdánská tráva – Hyso	18,06
Topol štěpka (různé klony)	18,7 – 19,2
Vrba štěpka (různé klony)	18,2 – 19

### 1.4.2. Vlhkost

Jedná se o zásadní vlastnost paliva, a to z důvodu uvedených u výhřevnosti. Čím vyšší bude obsah vody v palivu (vlhkost paliva), tím více energie se spotřebuje na její odpaření (bude odpovídat součinu výparného tepla a množství vody). Výsledný zisk energie z paliva bude tedy nižší.

Vlhkost u palivové biomasy značně kolísá, běžný obsah vody je 10 % až 65 %, přičemž nejvyšší hodnoty odpovídají čerstvé dřevní hmotě. [2]

V praxi se uvádějí dva způsoby vyjádření vlhkosti paliva, resp. obsahu vody v palivu:

- podle energetiky se jedná o podíl obsahu vody a celkového množství paliva

$$W = \frac{(M_V - M_S)}{M_V} * 100 \% ,$$

- podle dřevozpracujícího průmyslu se jedná o poměr obsahu vody a sušiny paliva

$$W = \frac{(M_V - M_S)}{M_S} * 100 \% ,$$

kde  $M_V$  je hmotnost mokrého vzorku,  $M_S$  hmotnost sušiny.

Voda v palivu se z hlediska jejího uložení rozdělí podle [8] na:

- Vodu chemicky vázanou – je součástí chemických sloučenin. Nelze ji z biomasy odstranit sušením, ale pouze spálením, proto je v biomase zastoupena i při nulové absolutní vlhkosti. Představuje 1–2 % sušiny.
- Vodu vázanou (hygroskopickou) – nachází se v buněčných stěnách a je vázána vodíkovými můstky na hydroxilové skupiny OH amorfni části celulózy a hemicelulóz. Voda vázaná se v palivu vyskytuje při vlhkostech 0 % až 30 % a při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností má největší a zásadní význam.
- Vodu volnou (kapilární) – vyplňuje v palivu lumény buněk a mezibuněčné prostory. Při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností má podstatně menší význam než voda vázaná.

Obsah vody v palivu lze měřit různými postupy. Podrobnější popis jednotlivých metod je k nalezení např. v [8]. Zde si principy měření rozdělíme podle několika kritérií:

- Stanovení vlhkosti oddělením vody od pevné fáze
  - metody přímé – váhová (gravimetrická) a destilační
- Stanovení vlhkosti na základě specifických vlastností vody
  - odezva některých chemických reakcí (metoda K. Fischera, metoda karbidu vápníku)
  - pohltivost elektromagnetického záření vysokých frekvencí
    - spektrometrická metoda (NIR)
    - metoda nukleární magnetické rezonance (NMR)
    - metoda pohlcování gama a rentgenového záření
    - měření útlumu mikrovlnné energie

- zpomalovací účinek vodíkových jader na rychlé neutrony
- vysoká rozpouštěcí schopnost a vytváření elektrolytů
- dipólový charakter molekul vody a související vysoká hodnota relativní permitivity
- Měření jiných veličin v souvislosti s obsahem vody
  - metody zaměřené na změnu elektrických vlastností materiálu (odporové, kapacitní, indukční)
  - metody zaměřené na změnu tepelných vlastností materiálu (změna součinitele tepelné vodivosti)

Pro praktickou část této práce bude používána přímá metoda gravimetrická, která vychází z definice vlhkosti paliva. Jedná se o nejpřesnější metodu pro určení obsahu vody ve dřevě a je také referenční metodou při posuzování přesnosti ostatních metod. [8]

Postup při této metodě spočívá v porovnání hmotnosti vzorku vlhkého  $M_v$  a vzorku po jeho úplném vysušení  $M_s$ . Sušení probíhá při teplotě  $103 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  po dobu závislou na druhu materiálu a jeho předpokládané vlhkosti. Vyhovující doba sušení je taková, při které mezi následujícími dvěma váženími v intervalu dvou hodin se hmotnost nezmění o více než 0,02 g, nebo 1 %. V této práci bude vyhovující sušení po přibližně 60 minut.

### 1.4.3. Složení paliva

Palivo se dle [9] skládá ze dvou složek:

- hořlaviny – tvoří ji aktivní látky: uhlík (C), vodík (H), síra (S), a pasivní látky: kyslík (O), dusík (N). Okysličováním hořlaviny dochází k uvolňování tepla.
- balastu – je tvořen popelovinami a vodou, v případě plyných paliv navíc nehořlavými plyny. Hlavními složkami popelovin jsou minerální látky:
  - jílové minerály ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $2\text{SiO}_2$ ,  $2\text{H}_2\text{O}$ ),
  - karbonáty ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{FeCO}_3$ ),
  - sulfidy ( $\text{FeS}_3$ ),
  - sulfáty (např.  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ),
  - oxidy ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) a další.



Tyto složky paliva jsou také popsány následující rovnicí.

$$h + A + W = 1,$$

kde (h) je složka hořlaviny, (A) je složka popelovin a (W) je složka vody.

Výhodou biomasy oproti uhlí je nízký obsah síry a tím tedy nízká produkce oxidu siřičitého. Nízký je také obsah dusíku, ale kvůli nutnosti vysoké teploty spalování vznikají termické NO<sub>x</sub>. Rovněž těžké kovy jsou v biomase zastoupeny zanedbatelně, jejich obsah je ale závislý na půdě, kde biomasa vyrostla. Některé druhy biomasy mají schopnost koncentrovat těžké kovy z půdy, proto je důležité, kde je biomasa pěstována a případně vzniklé popeloviny s obsahem těžkých kovů ukládat na skládky. [5]

Hořlavina biomasy má velký podíl takzvané prchavé hořlaviny. Ta bývá 75 % až 85 %. Při spalování tedy dochází nejdříve k uvolnění prchavé hořlaviny ve formě hořlavých plynů, což je doprovázeno tvorbou dlouhého plamene. Pro dokonalé spálení veškeré hořlaviny je nutno přivádět spalovací vzduch jako primární a sekundární. Primární vzduch je přiváděn přímo na palivo a účastní se hoření pevné části paliva a uvolňování prchavé hořlaviny. Sekundární vzduch je přiváděn do uvolněných hořlavých plynů, aby zajistil jejich dohoření. Někdy je zapotřebí přivést ještě terciální vzduch na úplné dohoření na konci ohniště. [5] [2]

Typické složení biomasy v porovnání s hnědým uhlím z [7]:

Tabulka 1.4.3-1 - Složení biomasy

Složka [%]	dřevo		kůra	hnědé uhlí
	jehličnaté	listnaté		
uhlík	51	50	51,4	69,5
vodík	6,2	6,15	6,1	5,5
kyslík	42,2	43,25	42,2	23,0
síra	-	-	-	1,0
dusík	0,6	0,6	0,3	1,0
popel v palivu	1,0	1,0	1,0	25

#### 1.4.4. Další vlastnosti paliva

- Teplota měknutí popelovin

Jedná se o teplotu, pod kterou by se mělo pohybovat spalování. Při jejím překročení dochází k tavení popelovin a tím vytváření usazenin na roštu, v topeništi a na teplosměnných plochách. To způsobuje snížení účinnosti kotle, rostoucí opotřebení a zvyšování emisí. Biomasa, která je charakteristická relativně nízkou teplotou měknutí popelovin, se spaluje při vyšších teplotách. Je proto nutné hlídat a optimalizovat spalování tak, aby nedocházelo k překročení této teploty. [7]

- Sypná hmotnost

Jedná se o charakteristickou vlastnost kusových paliv. Představuje poměr mezi hmotností a prostorem, které palivo zabírá. Zpravidla se zjišťuje naplněním nádoby o známém objemu a jejím zvážením a udává se v jednotkách  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ . Hodnoty sypné hmotnosti se u biomasy pohybují od  $40 \text{ kg}/\text{m}^3$  pro nejlehčí paliva, až po  $500 \text{ kg}/\text{m}^3$  pro dřevěné pelety a brikety. [7]

Tato vlastnost ovlivňuje hlavně velikost topenišť a dopravníků, které musejí zajistit přívod odpovídající hmotnosti paliva.

- Mechanická odolnost

Tato vlastnost ovlivňuje u zpracovaného paliva, jako jsou brikety nebo pelety, jeho odolnost proti poškození tvaru nebo soudržnosti. Nekvalitní materiál se může během přepravy, skladování nebo dávkování rozpadat, a tak ztrácet na svých výhodách, může docházet k úbytku využitelného paliva a v horších případech k riziku výbuchu palivového prachu. [7]

#### 1.5. Zpracování biomasy pro energetické účely

V některých případech je možné přímé využití biomasy, zejména v místech jejího zdroje. Ve většině případů je třeba různých úprav pro lepší přepravu, zlepšení výhřevnosti nebo kvůli technologii. Podle [3] rozeznáváme tři druhy úprav, a to mechanické, termické a biochemické a chemické přeměny. [3]

Mechanické zpracování formuje biomasu do podoby, která především usnadňuje přepravu nebo je přímo nutná pro technologii využití, např.: peletkové kotle.

Mezi tyto úpravy patří:

- řezání,
- drcení,
- štěpkování,
- lisování briket, resp. pelet,
- Lisování oleje, který je dále esterifikován na metylester.

Termické procesy slouží zejména k úpravě biomasy nevhodné pro přímé použití do formy vhodnější. Mezi tyto metody patří:

- Karbonizace – jedná se o zušlechťování dřeva na dřevěné uhlí metodou suché destilace v karbonizačních pecích a retortách. Na 1 tunu uhlí je potřeba zhruba 10 tun dřeva.
- Pyrolýza – Termický rozklad organických látek bez přístupu kyslíku. Použitím této metody je možné využít komunálního odpadu, papíru, pneumatik a plastů k výrobě biooleje.
- Zplyňování – Pro výrobu „generátorového plynu“ se využívá slámy, palivového nebo odpadního dřeva.

Biochemické a chemické přeměny:

- Alkoholová kvašení – organickou fermentací v mokřém prostředí následnou destilací rostlin obsahujících cukr a škrob se získává vysokoprocentní alkohol (etanol), který se následně využívá jako ekologické palivo pro spalovací motory. Teoreticky je možné získat z 1 kg cukru zhruba 0,65 litru čistého etanolu.
- Metanové kvašení – neboli anaerobní fermentace je proces zpracování odpadních vod a zvířecích exkrementů za nepřístupu vzduchu při teplotě 35-45 °C, čímž se vyrábí bioplyn.
- Esterifikace surových olejů – vylisovaný olej olejnatých rostlin se substitucí metylalkoholu za glycerin mění na metylester, který se vyznačuje podobnými vlastnostmi a výhřevností jako motorová nafta.

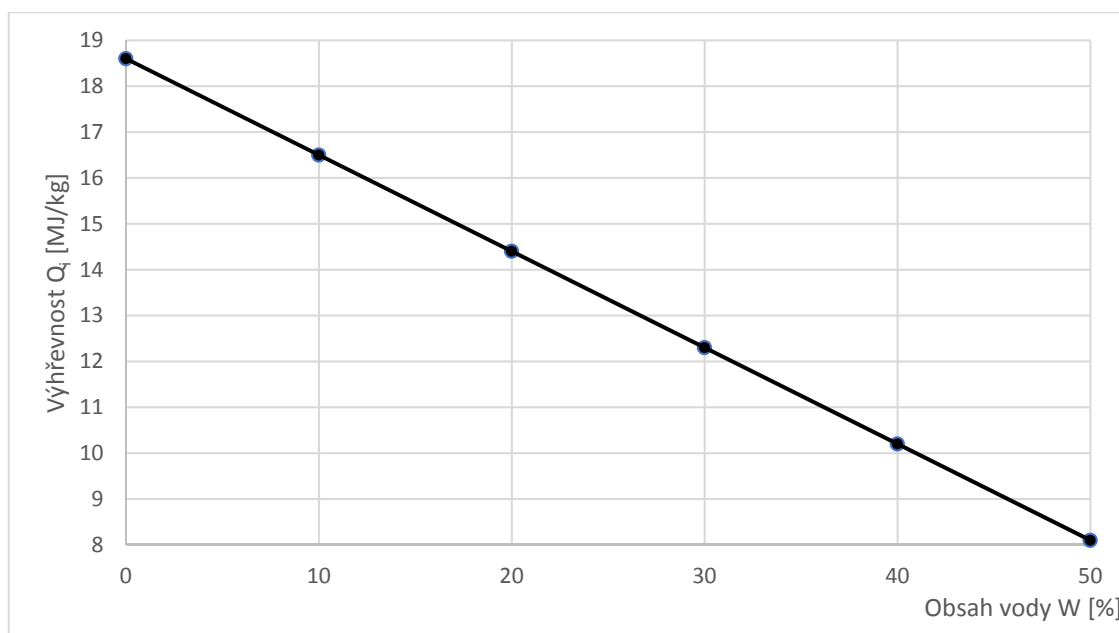
## 2. Sušení biomasy

### 2.1. Význam sušení biomasy

Potenciál kvalitní biomasy je v České republice téměř vyčerpaný a využívání méně kvalitní biomasy komplikuje hlavně vysoký obsah vody, který má zásadní vliv na výhřevnost paliva a účinnost spalovacích zařízení. Mezi tuto méně kvalitní biomasu patří mokrá kůra, zelená lesní štěpka, zemědělské odpady a odpady z potravinářské výroby. Tyto zdroje biomasy mají běžně obsah vody 55 % i více. [4]

Jak bylo zmíněno, obsah vody v palivu má zásadní vliv na množství energie, které z něj lze získat. V literatuře [2] je uveden příklad pro dřevní odpad, který má výhřevnost sušiny 20 MJ/kg, využívaný při spalování při obsahu vody 60 %. Výhřevnost takového odpadu bude tedy jen 40 %, tedy 8 MJ/kg. Spalování začíná odparem vody, na který se spotřebuje  $2453,5 \cdot 0,6 = 1472,1$  kJ, teda přibližně 1,5 MJ. Využitelná energie je tedy jen 6,5 MJ. Spálením 1 kg takového paliva vzniknou cca 4 m<sup>3</sup> spalin, které při teplotě 200 °C odvádějí komínem zhruba 1,2 MJ nevyužité energie a tím pádem je z paliva skutečně použito jen 5,3 MJ. Na rozdíl od toho při vysušení paliva na 10% obsah vody, dosáhneme přibližně 17,75 MJ využitelné energie.

Výhřevnost v závislosti na obsahu vody popisuje následující obrázek:



Obrázek 2.1-1 - Závislost výhřevnosti biomasy na obsahu vody [4]

Z této závislosti lze snadno vyjádřit význam sušení méně kvalitní mokré biomasy. Obsah vody v ní obsažené nejen snižuje výhřevnost a tím množství získatelné tepelné energie, ale také zhoršuje hoření, zvyšuje produkci spalin a škodlivin a nároky na technologii. Za hranici spalitelnosti se považuje obsah vody 55 %. [4]

Obecně se doporučuje obsah vody do 30 %, optimální je do 20 %. Ke snížení obsahu vody v palivu lze použít různých metod, které jsou popsány v další kapitole.

## **2.2. Způsoby sušení**

Sušení je fyzikální děj, při němž účinkem tepla dochází ke snižování obsahu vody v látkách bez vlivu na jejich chemické složení. Voda se při sušení odstraňuje vypařováním, odpařováním nebo sublimací. Při těchto principech dochází ke změně fáze vody a tím se sušení odlišuje od mechanických a chemických způsobů snižování obsahu vody. [10]

Sušit materiál můžeme přirozeně (pasivně) nebo uměle (aktivně).

### **2.2.1. Přirozené (pasivní) sušení**

Jedná se o nejstarší metodu sušení látek obecně. Sušení probíhá ve volném prostředí na vzduchu nebo přímo na slunci. Voda se na povrchu vypařuje a difunduje do okolního vzduchu. Výhodou tohoto způsobu sušení je bezesporu jeho jednoduchost a energetická nenáročnost. Velkou nevýhodou potom je náročnost na prostor a velmi dlouhá doba sušení, přičemž existuje hranice, pod kterou se palivo nevysuší. [10] Ta je většinou dána vlhkostí prostředí, u dřeva se jedná o vlhkost kolem 20 % [7].

Nejčastěji se využívá různých přístřešků, aby bylo zabráněno novému vlhnutí od deště apod. Nejjednodušším způsobem jsou např. obyčejný přístřešek beze stěn pro zajištění volného přístupu vzduchu, anebo se používá různých voděodolných nebo polopropustných pokrývek. [11] Využívá se také principu skleníku pro koncentraci tepla ze slunečního svitu.

Tato metoda pro naše účely využití biomasy v energetice není vhodná z důvodu časové náročnosti. Proto se využívá hlavně druhá metoda umělého sušení.

### 2.2.2. Umělé (aktivní) sušení

- Sušení tepelné

Jedná se o sušení v aparátech, kde za přívodu tepla (tedy vnější energie) dochází k odpařování nebo sublimaci. Tyto aparáty se nazývají sušárny. Probíhají v nich současně procesy přenosu tepla (přívod tepla do sušeného materiálu) a přenosu hmoty (odvod vlhkosti-páry). [12]

Mimo použití sušárny za přívodu tepla můžeme sušit také:

- mechanicky – filtrací, lisováním, odstřed'ováním.
- fyzikálně-chemicky – pomocí hydrokopických látek
- mražením – zmražení vlhkosti na krystaly ledu a následnou sublimaci do vodní páry

Sušárny jsou oproti přirozenému sušení výrazně energeticky i technologicky náročnější, přičemž zajišťují v relativně malém zařízení vysušení materiálu v řádu hodin, místo týdnů až měsíců. Díky rozmanitosti sušeného materiálu a požadavků na sušení jsou sušárny mnoha typů, lišící se ve své konstrukci i způsobu přívodu tepla.

### 2.3. Typy tepelných sušáren

Sušárny se na základě [10] dělí podle následujících hledisek na:

- a) Rozdělení podle způsobu sušení a sušáren podle sušícího prostředí
  - sušení vzduchem – teplovzdušná sušárna
  - sušení spaliny – spalínová sušárna
  - sušení inertním plynem – sušárna s inertním plynem
  - sušení přehřátou parou – sušárna s přehřátou parou
- b) Rozdělení podle provozního tlaku
  - sušení za atmosférického tlaku
  - sušení za stálého atm. tlaku
  - pulzační sušení za atm. tlaku
  - sušení ve vakuu
  - sušení za přetlaku
- c) Rozdělení podle převládajícího způsobu sdílení tepla
  - konvekční sušení
  - kontaktní sušení
  - sálavé sušení

- dielektrické sušení
  - odporové (elektrické) sušení
  - ultrazvukové sušení
- d) Sušení dle způsobu proudění sušícího prostředí
- sušení ofukováním
  - sušení profukováním
  - sušení s impaktním prouděním (kolmo na povrch materiálu)
  - sušení v proudu
  - sušení fluidizací
- e) Rozdělení podle povahy provozu
- periodická sušárna
  - kontinuální sušárna, souprroudá, protiproudová, křížoproudová
- f) Rozdělení sušáren podle pohybu materiálu
- vysoušený materiál je v klidu – roštová sušárna, skříňová sušárna
  - zdrojem pohybu mat. je pouze jeho potenciální energie – sesypná sušárna
  - zdrojem pohybu mat. je zejména kinetická energie suš. prostředí – proudová, fluidizační, rozprašovací
  - pohyb materiálu je obstaráván dopravním zařízením – vozíková, pásová, válečková, řetězová, talířová, válcová, bubnová, trubková
  - materiál se převrací a současně dopravuje – šneková, hrabadlová, vibrační

Při výběru vhodného typu sušárny, tedy kombinace vlastností uvedených výše, je nutné znát informace o sušeném materiálu, požadovanou kapacitu, tepelný výkon a režim provozu sušárny. [12]

Pro sušení biomasy pro centralizované zásobování teplem a elektrickou energií se dle existujících konstrukčních řešení jeví jako nejvhodnější varianta bubnových sušáren kontaktních a konvektivních. [13]

Více než 85 % průmyslových sušáren jsou konvektivní sušárny, které využívají pro sušení horký vzduch nebo spaliny.

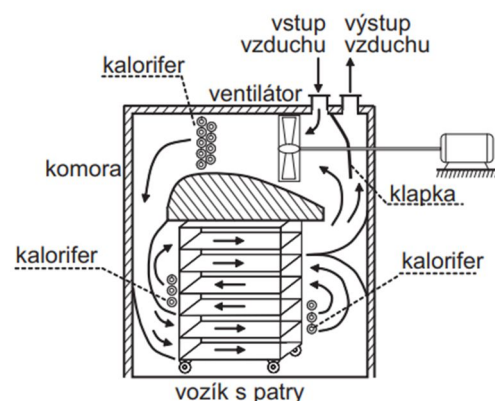
### 2.3.1. Konvektivní sušení

Přenos tepla a hmoty je zajištěn sušicím médiem, kterým může být horký vzduch, přehřátá pára nebo spaliny. Sušící médium zde přivádí do sušárny teplo, které předává materiálu a zároveň z něj odvádí vlhkost. [13]

Příklady sušáren tohoto typu převzaty z [12], [14] a [15].

- Komorové sušárny s ofukovanou nehybnou vrstvou

Zjednodušeně se dají tyto sušárny popsat jako sušící pece. Sušený materiál je zde zaveden v tenkých vrstvách na vozíku. Do komory je přiváděn horký vzduch, který zde cirkuluje, materiál vysouší a z části opouští komoru a tím odvádí vodní páru.



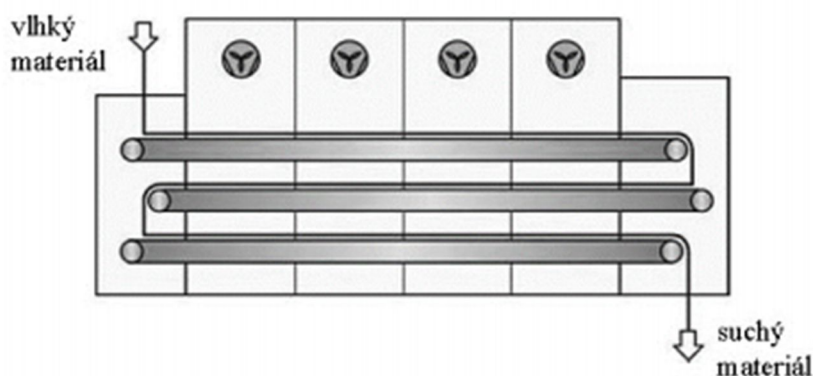
Obrázek 2.3.1-1 - Komorová sušárna [14]

Toto zařízení pracuje periodicky (vsádkově) a je vhodné zejména pro kusové látky, např. ovoce, zeleninu, bobule, maso, ... Vyznačuje se malým odpařovacím výkonem, cca  $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ .

- Komorové a pásové sušárny s profukovanou vrstvou

Sušárny, u nichž je sušená látka dopravována kontinuálně na pásích, které jsou profukovány sušicím médiem. Obvykle bývají konstruovány s několika pásy nad sebou.

Odpařovací výkon bývá  $10\text{--}100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  a zařízení je vhodné pro sušení hrubozrnných látek, např. obilí, krystalů, granulí, ovoce, zeleniny.



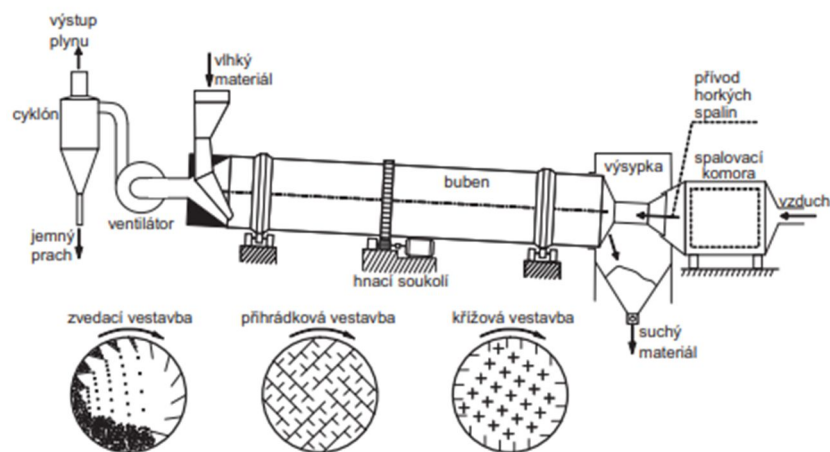
Obrázek 2.3.1-2 - Pásová sušárna [14]



- Bubnové sušárny

Principiálně jsou tyto sušárny konstruovány jako rotující buben vybavený vnitřní vestavbou, která zlepšuje promíchávání materiálu a zvyšuje kontaktní plochu. Díky naklonění bubnu dochází ke kontinuálnímu posouvání materiálu sušárnou a jedná se tedy o kontinuální sušárnu. Skrze buben je veden proud sušícího média. Používá se sou proud i protiproud.

Sušárna je vhodná pro polydisperzní, krystalické i drobné kusové látky. Odpařovací výkon se u těchto sušáren udává  $10\text{--}100\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ .

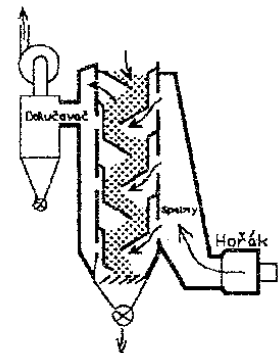


Obrázek 2.3.1-3 - Bubnová sušárna [15]

- Šachtové sesypné sušárny

Sušený materiál zde propadá gravitačně skrze sušárnu s vnitřní výstavbou. Příčně je skrze sušárnu vedeno sušící médium. K sušení zde dochází kontinuálně.

Vhodné zejména pro sypké materiály a drobné kusové látky jako např. obilí, drcené uhlí.



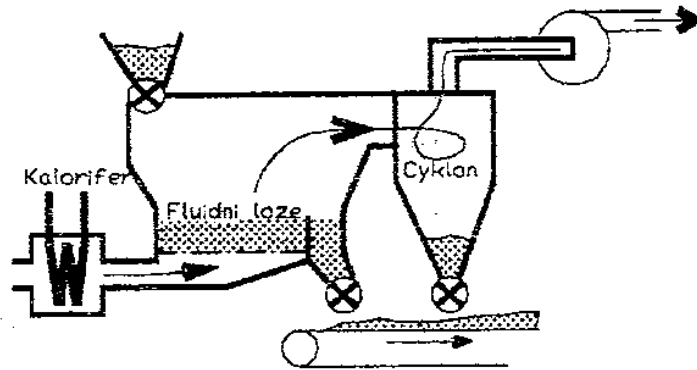
Obrázek 2.3.1-4 - Sesypná sušárna [12]

- Fluidní sušárny

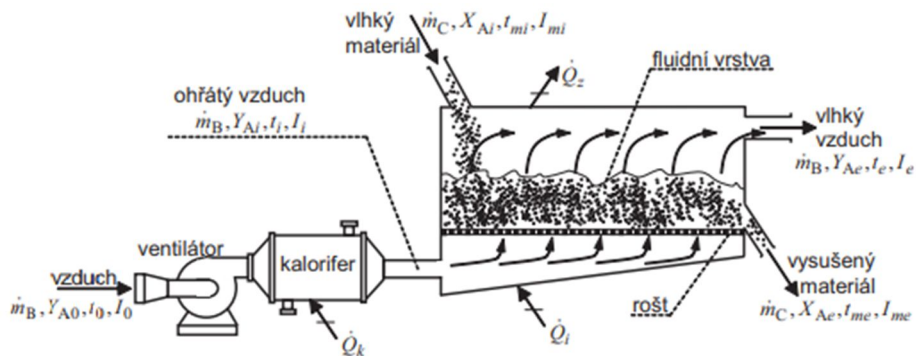
Fluidní sušárny mohou mít různé konstrukce a tím i různý způsob své práce. Sušený materiál se zde suší prostupem sušícího média skrze vrstvu sušeného materiálu, tzv. fluidní lože. Sušený materiál může být buď unášen proudícím médiem při dostatečném vysušení do další části sušárny, kde se od vzduchu oddělí vlastní tíhou nebo v cyklonovém odlučovači, nebo může být lože skloněno a fluidací dochází k jeho posuvu od vstupu vlhkého materiálu k výstupu vysušeného. V obou případech se jedná o kontinuální sušení.

Díky neustálému pohybu sušených částic v této fluidní vrstvě dochází k dobrému promíchávání a neustálému kontaktu se sušícím médiem. To způsobuje rychlé vysušení částic.

Tato metoda je vhodná pro víceméně monodispersní materiály: chemikálie, vláknité materiály, obilí, ovoce, zeleninu, cukr krystal, glukózu. Odpařovací výkon cca  $90 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ .



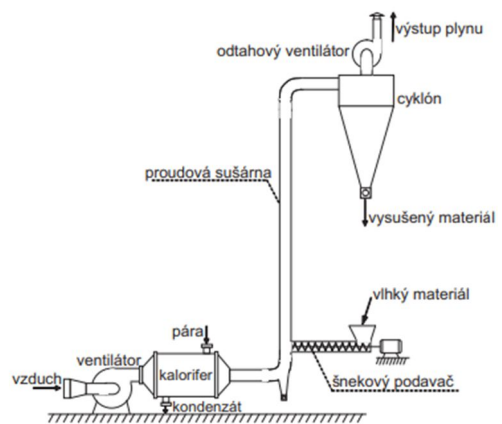
Obrázek 2.3.1-5 - Fluidní sušárna s úletem [12]



Obrázek 2.3.1-6 - Fluidní sušárna s nakloněným ložem [15]

o Proudové sušárny

Zde je materiál zpravidla práškový, zrnitý nebo vláknitý unášen proudem sušícího média do odlučovačů. K vysušení látky dojde přímým kontaktem se sušícím médiem během její současné přepravy. Metoda je náročná na odlučovače a také proud sušícího média musí mít vyšší rychlost, než je pádová rychlost sušené látky.



Obrázek 2.3.1-7 - Proudová sušárna [15]

Vyznačují se velmi vysokou rychlostí kontinuálního sušení (přímo závislé na délce potrubí od dávkovače sušené látky k odlučovačům a na rychlosti proudění sušícího média). Odpařovací výkon se udává  $4\text{--}300 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ .

Jako příklad takového sušení můžeme uvést sušení uhlí pro spalovací kotle parních elektráren s využitím recirkulace spalin. S rozdílem, že na konci sušení zpravidla nedochází k odlučování uhlí od směsi spalin a páry.

### 2.3.2. Kontaktní sušení

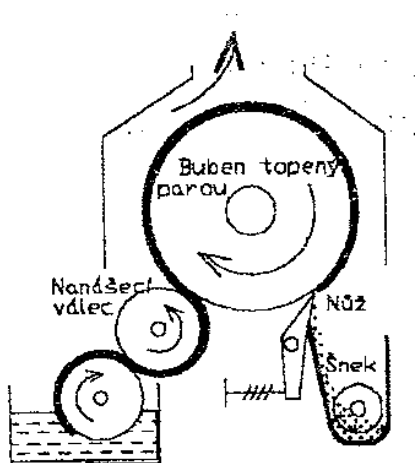
Sušení probíhá přenosem tepla kondukcí mezi sušeným materiálem a otápenou kontaktní plochou. Otápění kontaktní plochy se nejčastěji provádí parou, ale může být otápena také elektricky. Výhodou konduktivního přenosu tepla je nižší tepelný odpor proti konvektivnímu přenosu. Sušící médium v tomto případě slouží jen pro odvod vlhkosti (páry) od materiálu. [13]

Příklady sušáren tohoto typu převzaty z [12], [14] a [15].

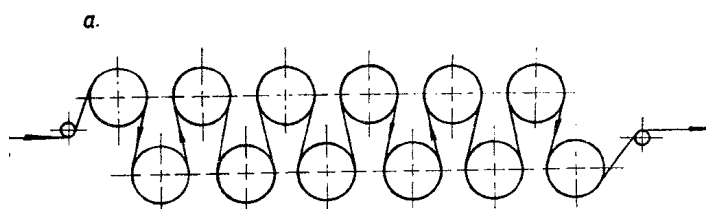
- Válcové sušárny

Jedná se o soustavu nanášecích válců a topeného bubnu nebo většího množství topených válců. Sušená látka je zde kontinuálně nanášena ze zásobníku pomocí nanášecích válců na topený válec ve formě filmu. Během otáčení válce dojde k vysušení látky a k jejímu sejmutí z válce pomocí nože. Díky tenké vrstvě dojde k velmi rychlému usušení, doby sušení 2-10 s.

Vhodné pro sušení pastovité či kapalné látky. Odpařovací výkon  $7\text{--}30 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ .



Obrázek 2.3.2-2 - Válcová sušárna [12]

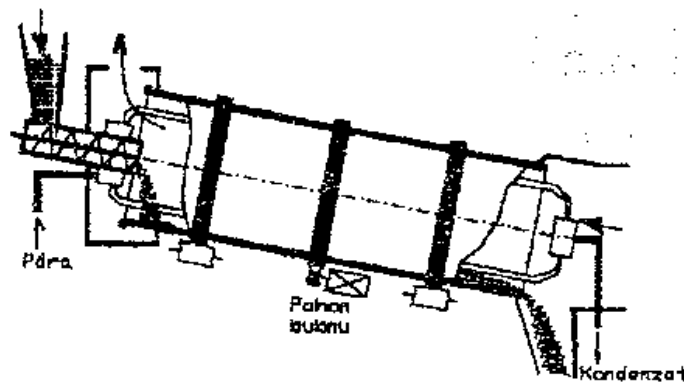


Obrázek 2.3.2-1 - Válcová sušárna pro sušení papíru [10]

- Bubnová sušárna

Konstrukčně se jedná o téměř shodné provedení jako v případě bubnové sušárny konvektivní. Skrze nakloněný buben, který se otáčí, prochází kontinuálně sušený materiál a otáčením se promíchává a posouvá bubnem k výsypnému konci. K sušení dochází kontaktem sušené látky s otápenou plochou bubnu nebo s trubkami vedenými vnitřkem bubnu. Teplo je do bubnu přiváděno buď pomocí páry, která během průchodu kondenzuje, nebo pomocí elektrického proudu.

Vhodné pro sušení křehkých krystalických materiálů, kusových či pastovitých látek.

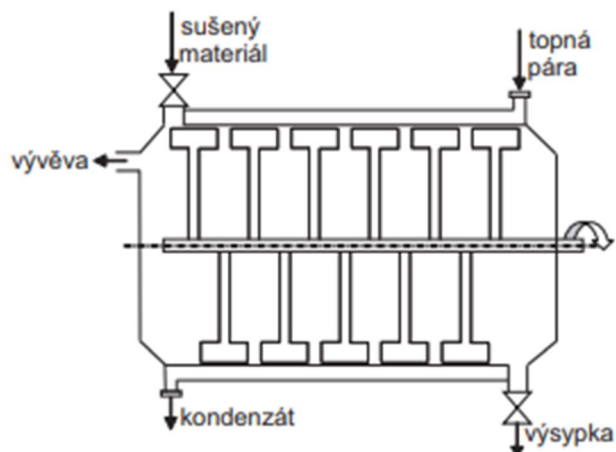


Obrázek 2.3.2-3 - Bubnová sušárna konduktivní [12]

- Lopátkové sušárny

Jedná se o zpravidla vakuovou sušárnu s kontinuálním sušením. Buben, který je ohříván buď parou ve dvojitěm plášti nebo elektricky, v sobě skrývá míchací lopatky. Ty zajišťují promíchávání a posuv materiálu. Vakuové sušení má výhodu ve snížené teplotě varu (odpařování) vody a tím snížené energetické náročnosti na otop a zároveň je šetrnější k sušené látce, která může vlivem teploty degradovat.

Vhodné sušárny pro sušení pastovitých a kusových materiálů, např. barev, práškových kovů, acetátu, celulózy, škrobů. Odpařovací výkon cca  $10-15 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ .



Obrázek 2.3.2-4 - Lopatková sušárna [15]

## 2.4. Sušárny vhodné pro biomasu

Nejčastější sušárny pro biomasu jsou dle [16]:

- Konvektivní
  - Proudové
  - Fluidní
  - Rotační
- Kontaktní
  - Rotační trubkové

Jak se zmiňuje doktor Havlík ve svém článku [16], energeticky výhodnější jsou sušárny kontaktní. Zdroj tepla je energeticky méně náročný a snižuje se ztráta energie v odcházejících plynech. Vzniklá pára může být využita v dalším energetickém procesu, neboť se jedná o čistou páru. Typická energetická náročnost konvektivních sušáren se pohybuje v rozmezí 4000 až 6000 kJ na kg odpařené vody, přičemž v případě kontaktních sušáren se jedná o rozmezí 2800 až 3600 kJ na kg odpařené vody. V následující tabulce jsou příklady dle [16].

Tabulka 2.4-1 - Srovnání energetické spotřeby různých sušáren

Typ sušky	Spotřeba energie [MJ na 1 kg odpařeno vody]
Proudová suška	4,5 – 9,0
Fluidní suška	4,0 – 6,0
Rotační	4,6 – 9,2
Rotační trubková (bubnová) suška	3,2 – 6,5

Dále budu v této práci popisovat sušení kontaktní pro kusové (sypké) materiály. Dnes konvekční metody sušení nejsou pro biomasu moc vhodné a kontaktní sušení vychází jako energeticky méně náročné než uvedené způsoby sušení konvekcí. V teorii sušení a návrhu sušárny budu používat jako sušený materiál dřevní štěpku, se kterou byly současně provedeny experimenty.

### 3. Teorie kontaktního sušení

#### 3.1. Fyzikální popis sušení

Jedná se o fyzikální proces, při kterém dochází k současnému přenosu tepla (ohřev a sušení) a hmoty (odpařování a odvod par). Tento proces je navíc komplikován strukturou sušeného materiálu, dřevní štěpky s různě velikými částicemi, a způsobem promíchávání materiálu uvnitř sušárny. Dále je pro teoretický popis uvažován typ kontaktní sušárny s lopatkovým míchadlem.

Pro získání funkčního popisu je třeba zavést několik zjednodušení.

- Popisuje se pouze vedení tepla
- Sušený materiál se bere jako homogenní vrstva
- Zjednodušený popis míchání a přidaného tepla od míchadla
- Zanedbání tepelných ztrát do okolí provedením adekvátní izolace

Následující popis přenosu tepla vychází z popisu v [17].

Obecně se dá popsat přenesené teplo z otápěného povrchu do statického nebo míchaného lože materiálu pomocí rovnice

$$Q = UA(T_1 - T_2), \quad 3.1-1$$

kde  $Q$  je přenesené teplo,  $U$  je celkový součinitel prostupu tepla,  $A$  je teplosměnná plocha,  $T_1$  je teplota otápěného povrchu a  $T_2$  je teplota sušeného materiálu.

Celkový součinitel prostupu tepla  $U$  je sumou odporů, které jsou v systému, a je popsán rovnicí

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_h} + \frac{1}{h_w} + \frac{1}{h_f} + \frac{1}{h_m} + \frac{1}{h_v}, \quad 3.1-2$$

kde  $1/h_h$  je odpor mezi tepelným médiem a otápanou stěnou,  $1/h_w$  je odpor přes otápanou stěnu,  $1/h_f$  je odpor přestupu z otápané stěny do sušeného materiálu,  $1/h_m$  je odpor v sušeném materiálu,  $1/h_v$  je odpor na povrchu sušeného materiálu pro odpar vlhkosti.

Z těchto tepelných odporů jsou nejvýznamnější odpor mezi otápanou stěnou a materiálem (tzv. kontaktní odpor) a odpor v materiálu.

Schlünder v r. 1984 formuloval rovnice pro odhad kontaktního odporu a odporu v materiálu při kontaktu s otápanými stěnami. Tyto rovnice jsou

$$h_m = \frac{2 \sqrt{(\rho c \lambda)_{bed}}}{\pi \sqrt{t_R}}, \quad 3.1-3$$

a

$$\frac{U}{h_f} = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{\tau}}, \quad 3.1-4$$

kde  $\rho$ ,  $c$  a  $\lambda$  jsou hustota [ $\text{kg/m}^3$ ], tepelná kapacita [ $\text{J/kg.K}$ ] a tepelná vodivost [ $\text{W/m.K}$ ] sušeného materiálu,  $\tau = (h_f^2 / (\rho c \lambda)_{bed}) t$  je bezrozměrná doba kontaktu materiálu s teplosměnnou plochou platná pro vrstvu materiálu bez míchání. Dosazením  $h_m = h_f$  je možné získat kritickou dobu kontaktu; pokud  $\tau < t_c$ , potom bude  $U$  pro nemíchanou vrstvu a míchanou shodné.

$$t_c = \frac{4 (\rho c \lambda)_{bed}}{\pi h_f^2}. \quad 3.1-5$$

Pro získání podobného vyjádření pro míchané vrstvy se předpokládá fiktivní časová perioda  $t_R$ , během které se míchaná vrstva považuje za stacionární. Tento předpoklad poskytuje oscilující součinitel okamžitého prostupu tepla a časový průměr těchto hodnot poskytuje celkový součinitel prostupu tepla v míchané vrstvě  $U_\infty$ .

Hodnota  $t_R$  se vypočítá pomocí

$$t_R = N_{mix} t_{mix}, \quad 3.1-6$$

kde  $N_{mix}$  je tzv. míchací číslo, zjištěné experimentálně a závislé na mechanických vlastnostech systému a na Froudově čísle,  $t_{mix}$  je časová konstanta míchadla, která může být brána jako doba potřebná pro jednu otáčku míchadla.

Přibližné hodnoty míchacího čísla leží v rozmezí 2-25 a je prakticky nezávislé na teplotě horkého povrchu, provozním tlaku a obsahu vody v sušeném materiálu. Zjednodušeně lze považovat za potřebný počet otáček míchadla pro dokonalé promíchání všech částic ve vrstvě. Pro upřesnění doporučili Schlünder a Mollekopf v r. 1984 následující korelaci

$$N_{mix} = C Fr^x, \quad 3.1-7$$

kde  $Fr = ((2\pi n)^2 D / 2g)$ ,  $D$  je průměr bubnu (míchadla) a  $n$  jsou otáčky míchadla. Hodnoty  $C$  a  $x$  najdeme v následující tabulce:

Tabulka 3.1-1 - Hodnoty  $C$  a  $x$  pro různé sušárny

Typ sušárny	C	x
Disková sušárna	25	0,20
Rotační bubnová sušárna	16	0,20
Lopátková sušárna	9	0,05

Dle tohoto rozlišení se dále budu zabývat popisem sušení v lopátkové sušárně.

Poté nahradíme bezrozměrnou dobu kontaktu  $\tau$  z rovnice 3.1-4 za

$$\tau_R = N_{therm} N_{mix}, \quad 3.1-8$$

kde  $N_{therm} = (h_f^2 t_{mix} / (\rho c \lambda)_{bed})$ . Potom přepis rovnice 3.1-4 pro celkový součinitel prostupu tepla je

$$\frac{U_\infty}{h_f} = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{N_{therm} N_{mix}}}. \quad 3.1-9$$



Pro odhad hodnoty součinitele prostupu tepla kontaktem  $h_f$  se použije následující zjednodušená rovnice

$$h_f = \phi_A h_{fp} + (1 - \phi_A) \frac{2\lambda_G/d}{\sqrt{2} + (2l + 2\delta)/d} + h_{rad}, \quad 3.1-10$$

kde  $h_{fp}$  je součinitel prostupu tepla jedinou částicí a vypočte se dle

$$h_{fp} = \frac{4\lambda_G}{d} \left[ \left( 1 + \frac{2l + 2\delta}{d} \right) \ln \left( 1 + \frac{d}{2l + 2\delta} \right) - 1 \right], \quad 3.1-11$$

kde  $\lambda_G$  je tepelná vodivost plynu,  $\phi_A$  je faktor pokrytí povrchu desky, jehož hodnoty jsou okolo 0,8,  $d$  je průměr částic,  $\delta$  je drsnost povrchu částic (u které se předpokládá ve většina případů hodnota 0, výjimečně 1),  $l$  je modifikovaná střední volná cesta molekul plynu, která může být vypočítána dle

$$l = 2\Lambda \frac{2 - \gamma}{\gamma}, \quad 3.1-12$$

kde  $\Lambda$  je střední volná cesta molekul plynu a  $\gamma$  je tzv. accommodation koeficient ležící v rozmezí 0,8-1 pro normální plyny. Střední volná cesta molekul plynu se vypočte následovně

$$\Lambda = \frac{16}{5} \sqrt{\frac{RT}{2\pi M p} \mu}, \quad 3.1-13$$

kde  $\mu$  je dynamická viskozita plynu,  $p$  a  $T$  jsou stavové veličiny plynu tlak a teplota,  $M$  je hmotnost molekul plynu a  $R$  je univerzální plynová konstanta.

Další proměnou při výpočtu součinitele prostupu tepla je  $h_{rad}$ , která zohledňuje vliv radiace (sálání) a vypočte se dle rovnice

$$h_{rad} = 4C_{12}T_m^3, \quad 3.1-14$$

kde celkový radiální součinitel  $C_{12}$  vypočteme z

$$C_{12} = \sigma \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{wall}} + \frac{1}{\varepsilon_{bed}} - 1}, \quad 3.1-15$$

kde  $\sigma$  je radiace absolutně černého tělesa  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$  a  $\varepsilon_{wall}$  a  $\varepsilon_{bed}$  jsou emisivity stěny a povrchu vrstvy sušeného materiálu. Vliv radiace je vlivem nízkých teplot sušení v kontaktních sušárnách nepatrný.

Pro stanovení tepelné vodivosti ve vrstvě monodisperzního nebo polydisperzního materiálu o kulovitých nebo nekulovitých částicích v rozmezí teplot 100-1500 K a tlaku  $10^{-3}$  do 100 bar mohou být použity následující korelace od Schlündera

$$\frac{\lambda_{bed}}{\lambda_G} = (1 - \sqrt{1 - \psi}) \left( \frac{\psi}{\psi - 1 + \lambda_G/\lambda_D} + \psi \frac{\lambda_R}{\lambda_G} \right) + \sqrt{1 - \psi} \left[ \phi_K \frac{\lambda_S}{\lambda_G} + (1 - \phi_K) \frac{\lambda'_{bed}}{\lambda_G} \right], \quad 3.1-16$$

a

$$\begin{aligned} & \frac{\lambda'_{bed}}{\lambda_G} \\ &= \frac{2}{K} \left( \frac{B \left( \frac{\lambda_S}{\lambda_G} + \frac{\lambda_R}{\lambda_G} - 1 \right) \left( \frac{\lambda_G}{\lambda_D} \right) \left( \frac{\lambda_G}{\lambda_S} \right)}{K^2} \ln \frac{\left( \frac{\lambda_S}{\lambda_G} + \frac{\lambda_R}{\lambda_G} \right) \lambda_G/\lambda_D}{B \left[ 1 + \left( \frac{\lambda_G}{\lambda_D} - 1 \right) \left( \frac{\lambda_S}{\lambda_G} + \frac{\lambda_R}{\lambda_G} \right) \right]} \right. \\ & \left. + \frac{B + 1}{2B} \left( \frac{\left( \frac{\lambda_R}{\lambda_G} \right) \lambda_G}{\lambda_D} - B \left[ 1 + \frac{\left( \frac{\lambda_G}{\lambda_S} - 1 \right) \lambda_R}{\lambda_G} \right] - \frac{B - 1}{K} \frac{\lambda_G}{\lambda_D} \right) \right), \quad 3.1-17 \end{aligned}$$

kde

$$K = \frac{\lambda_G}{\lambda_D} \left[ 1 + \left( \frac{\lambda_R}{\lambda_G} - B \frac{\lambda_D}{\lambda_G} \right) \frac{\lambda_G}{\lambda_S} g \right] - B \left( \frac{\lambda_G}{\lambda_D} - 1 \right) \left( 1 + \frac{\lambda_R \lambda_G}{\lambda_G \lambda_S} \right), \quad 3.1-18$$

$$B = C_{shape} \left( \frac{1 - \psi}{\psi} \right)^{-0,9} f(\xi_r), \quad 3.1-19$$

$$\frac{\lambda_R}{\lambda_G} = \frac{4c_s}{2/(\varepsilon - 1)} T_m^3 \frac{x_R}{\lambda_G}, \quad 3.1-20$$

$$\frac{\lambda_G}{\lambda_D} = 1 + \frac{2\Lambda}{x_D} \left( \frac{2}{\gamma} - 1 \right), \quad 3.1-21$$

kde  $x_R = R_{shape}d$  a  $x_D = D_{shape}d$ . Pro tento případ je  $d$  ekvivalentní průměr částice a spočte se  $d = \sqrt[3]{6V/\pi}$ , pokud  $V$  je objem částice.  $R_{shape}$  a  $D_{shape}$  jsou faktory tvaru pro intersticiální přenos energie radiací a molekulárním tokem. Relativní parametry kontaktní plochy částic,  $\phi_K$  a 3 tvarové faktory musí být vyhodnoceny z experimentů. Typické hodnoty těchto parametrů jsou:  $C_{shape} = 1,25$ ,  $R_{shape} = 1$ ,  $D_{shape} = 1$  a  $\phi_K = 0,0013$  pro ocel.

Pokud se vrstva materiálu skládá z částic různých velikostí hmotnostních frakcí, musí se hodnoty  $x_R$  a  $x_D$  vypočíst dle následujících rovnic

$$\frac{1}{x_R} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta z_i}{R_{shape,i} d_i}, \quad 3.1-22$$

$$\frac{1}{x_D} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta z_i}{D_{shape,i} d_i}. \quad 3.1-23$$

Nakonec funkce rozložení velikosti částic  $f(\xi_r)$

$$f(\xi_r) = 1 + 3\xi_1, \quad 3.1-24$$

kde  $\xi_1$  je distribuční součinitel a vypočte se z rovnice

$$\xi_1 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \Delta z_i / d_i^2}{(\sum_{i=1}^n \Delta z_i / d_i)^2} - 1 \right]^{1/2}. \quad 3.1-25$$

Kvůli složitosti těchto výpočtů a několika blíže nevysvětlených proměnných, které se v těchto vzorcích nachází, budeme užívat přibližného odhadu tepelné vodivosti  $\lambda_{bed}$ . Tento odhad stanovíme jako poměrný součinitel tepelné vodivosti mezi sušeným materiálem, vodou obsaženou v materiálu a vzduchem, který vyplňuje prostor mezi částicemi materiálu, tak, abychom zohlednili jejich hmotnostní podíl.

$$\lambda_{bed} = \frac{m_w * \lambda_w + m_d * \lambda_d + m_{vzd} * \lambda_{vzd}}{\lambda_w + \lambda_d + \lambda_{vzd}} \quad 3.1-26$$

Pro lopatkové sušárny v případě, že dojde k odpaření veškeré vody z povrchu částic, platí pro nehygroskopické materiály, že odpor proti vedení tepla a hmoty jsou výše zmíněné kontaktní a materiálové odpory. Navíc s přibýváním vysušených částic se snižuje kontakt vlhkých částic s otápeným povrchem a snižuje se tak rychlost sušení.

V takovém případě lze odhadnout rychlost sušení  $\dot{m}(X)$  společně s teplotou sušené hmoty postupným výpočtem obsahu vody a teploty dle následujících rovnic

$$\dot{m}(X) = \frac{U_{wet}(T_w - T_s) \exp(-\xi^2)}{\lambda}. \quad 3.1-27$$

Pokles vlhkosti částic během kontaktu je odhadován

$$\Delta X = \frac{\dot{m}(X)t_{RA}}{M_{dry}} \quad 3.1-28$$

a přenesen a využit k výpočtu rovnice

$$\Delta T_b = \frac{\lambda}{c_{p,bed} + Xc_{p,L}} \frac{1 - \exp(-\zeta^{-2})}{\exp(-\zeta^{-2})} \Delta X, \quad 3.1-29$$

kde  $c_{p,bed}$  a  $c_{p,L}$  jsou tepelné kapacity sušeného materiálu a odpařující se kapaliny,  $T_w$  je teplota kontaktní plochy,  $T_s$  je teplota odpařování a  $\lambda$  je latentní teplo z odpařování.

Poměr celkového součinitele prostupu tepla mokrého lože k součiniteli kontaktního prostupu tepla je popsán

$$\frac{U_{wet}}{h_f} = \frac{1}{1 + (h_f/U_{dry} - 1) \operatorname{erf}(\zeta)}, \quad 3.1-30$$

kde

$$\sqrt{\pi} \exp(\zeta^2) \left[ 1 + \left( \frac{h_f}{U_{dry}} - 1 \right) \operatorname{erf}(\zeta) \right] = \left( \frac{h_f}{U_{dry} - 1} \right) \frac{1}{\xi}, \quad 3.1-31$$

$$\xi = \frac{X\lambda}{c_{p,bed}(T_w - t_b)}. \quad 3.1-32$$

Následně poměr celkového součinitele prostupu tepla pro suché lože a součinitel kontaktního prostupu tepla je popsán

$$\frac{U_{dry}}{h_f} = \frac{1}{1 + (\sqrt{\pi}/2)\sqrt{N_{therm}N_{mix}}}, \quad 3.1-33$$

Neboť dřevní biomasa je hygroskopický materiál, budeme aplikovat ještě následující postupy, které zohledňují obsah vody vázaný v částicích, použitím účinné tepelné kapacity hygroskopického lože.

$$c_{p,bed,h} = c_{p,bed} + c_{p,L}X_h - \lambda \left( \frac{\partial X_h}{\partial T} \right)_p, \quad 3.1-34$$

kde  $(\partial X_h/\partial T)_p$  je sklon sorpční izobary a  $X_h$  je vázaná vlhkost.

Pokud se dá sorpční izobara považovat za lineární, zapíše se rovnice 3.1-32 ve tvaru

$$c_{p,bed,h} = c_{p,bed} + c_{p,L}X_h - C_1\lambda, \quad 3.1-35$$

kde  $C_1$  je konstanta.

Úbytek vázané vlhkosti pak může být získán z

$$\Delta X_h = C_1\Delta T, \quad 3.1-36$$

a součet  $\Delta X_f$  a  $\Delta X_h$  je pak roven celkovému úbytku obsahu vody ve vrstvě materiálu a může být dále použit v rovnici 3.1-27 k výpočtu celkové rychlosti sušení.

Po získání rychlosti sušení je možné vypočítat velikost kontaktní plochy pro sušení pomocí integrálu

$$I = \int_{X_{out}}^{X_{in}} \frac{dX}{\dot{m}(X)}, \quad 3.1-37$$

Pro případ dávkovacích sušáren integrál dává požadovanou kontaktní plochu  $A$  a potřebný čas kontaktu  $t_{dry}$

$$At_{dry} = M_{dry}I, \quad 3.1-38$$

kde  $M_{dry}$  je hmota zcela suchých částic. Pro kontinuální sušení je potřebná plocha

$$A = \dot{M}_{dry}I. \quad 3.1-39$$

### 3.2. Parametry sušárny ovlivňující proces sušení

Pod pojmem sušení se rozumí přivádění tepla ze zdroje tepla do sušeného materiálu, tedy předávání tepelného toku  $Q$  do materiálu, ze kterého se uvolňuje vlivem přivedeného tepla voda ve formě páry.

Hlavní parametry sušárny ovlivňující proces sušení jsou definovány rovnicí (3.1-1) -  $Q = UA(T_1 - T_2)$ . Tedy součinitel prostupu tepla  $U$ , kontaktní plocha mezi sušeným materiálem a otápenou stěnou  $A$ , rozdíl teplot mezi sušeným materiálem a otápenou stěnou ( $T_1 - T_2$ ).

### 3.2.1. Rozdíl teplot ( $T_1-T_2$ )

Teplota otápěné stěny  $T_1$  je dána způsobem otápení – parou, elektricky, spaliny. Čím vyšší bude teplota otopu, tím větší bude předávané teplo do sušeného materiálu. Ne pro každý materiál je možné zvyšovat neomezeně teplotu sušení. Např. pro krmiva je teplota omezena, aby nedocházelo k jeho teplotní degradaci. V případě našem, kdy sušíme biomasu, nás teplota sušení neomezuje. Nevýhodou zvyšování  $T_1$  je současně se zvyšující tepelná ztráta do okolí a ztráta vneseným teplem ve vysušeném materiálu.

Teplota sušeného materiálu  $T_2$  je dána teplotou vypařování vody, ta je závislá na tlaku v prostoru sušárny. Při sušení za atmosférického tlaku se jedná o teplotu 100 °C.

Pro zvýšení rozdílu teplot je možno využít snížení tlaku v sušárně pomocí vývěvy, čímž se sníží teplota vypařování. Toto je zejména vhodné pro sušení materiálů, které mají omezení maximální teploty, tedy teploty otopu, jak již bylo zmíněno pro krmiva. Nevýhodou snižování teploty vypařování je riziko kondenzace par na chladnějších částech sušárny, např. v hrdle pro odvod par vývěvou.

### 3.2.2. Velikost kontaktní plochy A

Dle uvedeného vzorce (3.1-1) je logické, že zvětšováním kontaktní plochy dojde ke zvýšení předaného tepla. Se zvětšením kontaktní plochy dojde současně ke změně několika dalších parametrů.

V případě, že zůstane zachováno sušené množství, dojde k jeho rozprostření na větší plochu a tím také ke zmenšení vrstvy. Velikost sušené vrstvy, tedy její výška, je zásadní parametr pro sušení. Zmenšením tloušťky se výrazně zlepšuje součinitel prostupu tepla  $U$  vlivem odpařování z povrchu [17].

Standardně ovšem zvětšení kontaktní plochy znamená zvětšení sušárny a tím i sušeného množství. To samo o sobě nevede ke zlepšení sušícího procesu daného množství materiálu.

### 3.2.3. Součinitel prostupu tepla $U$

Jak bylo zmíněno v předchozím odstavci, značný vliv na součinitel prostupu tepla má výška vrstvy sušeného materiálu. Jejím zmenšením dojde ke zvýšení součinitele díky převládajícímu vlivu odpařování z povrchu vrstvy. Dalším významným vlivem je obsah vody v sušeném materiálu, neboť voda má vyšší součinitel tepelné vodivosti než sušina biomasy.

To zcela logicky vede k závěru, že proces sušení je nekonstantní. Při velkém počátečním obsahu vody je rychlost sušení vyšší než při sušení téměř suchého materiálu. [17]

Jako příklad si můžeme uvést bubnové sušárny, u nichž se součinitel prostupu tepla pohybuje v rozmezí 105-345 W/m<sup>2</sup>K, a rotační sušárny s trubkami vytápěnými parou se součinitelem prostupu tepla v rozmezí 30-90 W/m<sup>2</sup>K v závislosti na rychlosti otáčení bubnu, toku vzduchu pro odvod par a tlaku použité páry.

Z rovnice (3.1-2) pro výpočet součinitele prostupu tepla nás zajímají jen dvě proměnné složky, a to odpor při přestupu z otápné stěny na materiál  $1/h_f$  a odpor při vedení materiálem  $1/h_m$ .

Pro přestup tepla z otápné stěny na materiál je využita rovnice (3.1-10), jejíž složky respektují vedení kontaktem s částicemi materiálu, přestup tepla do vzduchem vyplněného prostoru mezi částicemi a také vliv radiace tepla z horkých částic a otopných ploch. Radiační vliv je ale vlivem relativně nízkých teplot zanedbán a nemusí být pro rovnici počítán. Parametry této rovnice jsou závislé zejména na velikosti sušených částic a nepatrně na prostředí, ve kterém sušení probíhá. Např. zmenšením sušených částic z 20 mm na 5 mm (tedy 4x) dojde k nárůstu hodnoty  $h_f$  přibližně 3,5x. Současně s tímto zmenšením částic můžeme předpokládat lepší pokrytí otápné plochy a zvýšení faktoru  $\phi_A$ . Budeme-li uvažovat tento faktor o hodnotě 0,9 místo původních 0,8, dojde k nárůstu  $h_f$  4x při stejném zmenšení částic.

Pro vedení tepla v materiálu využijeme rovnici (3.1-3), která je závislá na druhu sušeného materiálu  $(\rho c \lambda)_{bed}$  a době setrvání částic v kontaktu s otápnou plochou  $t$ . Snížením doby kontaktu, např. pomocí míchání sušené vrstvy materiálu, zvýšíme hodnotu prostupu tepla. Z materiálových vlastností můžeme ovlivnit pouze tepelnou vodivost materiálu, která je popsána rovnicí (3.1-16). V následujících rovnicích (3.1-17) až (3.1-21) jsou popsány výpočty jednotlivých složek pro výpočet  $\lambda_{bed}$ . Z těchto rovnic vyplývá závislost zejména na velikosti částic sušeného materiálu a také tepelné vodivosti jednotlivých složek vrstvy materiálu. V rovnicích (3.1-22) až (3.1-25) jsou popsány úpravy výpočtu pro částice nesterjých rozměrů.

Další způsob, jak výrazně ovlivnit součinitel prostupu tepla, je použít míchání. Díky míchání dojde k mnoha změnám. Jednou z nich je fakt, že ve stacionární vrstvě dochází po jistém čase ke kontaktu s otápnou plochou pouze suchých částic a k částicím obsahujícím vodu je teplo dopravováno skrze vrstvu suchého materiálu. Mícháním se zajistí trvalý přesun částic ve vrstvě, a tak i ke kontaktu vlhkých částic z horní části vrstvy s otápnou plochou.

Další změnou je, že samotné míchadlo slouží jako zdroj tepla přímo uvnitř vrstvy materiálu. To se dá např. uvažovat v rozměru  $A$  kontaktní otopné plochy. Vliv míchání a výsledný součinitel přestupu tepla je popsán rovnicemi (3.1-6) až (3.1-9). Výstupy z rovnic pro míchání jsou závislé zejména na otáčkách míchadla  $n$ , součiniteli tepelné vodivosti  $\lambda_{bed}$  a součiniteli přestupu tepla z otopné plochy do materiálu  $h_f$ .

### **3.3. Závěr analýzy parametrů sušárny ovlivňujících proces sušení**

Nejvýznamnější parametry sušárny ovlivňující tepelný tok a součinitel prostupu tepla:

- Teplotní spád mezi teplotou odparu vody a teplotou otopné stěny
- Velikost kontaktní plochy mezi materiálem a otopnou stěnou
- Výška vrstvy sušeného materiálu
- Velikost částic ve vrstvě sušeného materiálu
- Promíchávání vrstvy sušeného materiálu

Zvyšováním teploty otopu přímo zvedáme množství dodávaného tepla do materiálu a tím urychlujeme proces sušení. Snížením tlaku v sušárně získáme větší teplotní rozdíl. Tento postup je ovšem zajímavý jen pro materiály citlivé na sušící teplotu.

Zvětšování kontaktní plochy vede zejména ke zvýšení sušeného množství. Při zachování sušeného množství dojde k rozprostření materiálu a tím zmenšení výšky sušené vrstvy, což napomáhá lepšímu vedení tepla ve vrstvě.

Výška vrstvy sušeného materiálu by měla být co nejmenší. Projevuje se zejména na hodnotě tepelné vodivosti vrstvy. Jejím zmenšením dojde k nárůstu tepelné vodivosti v důsledku odpařování z povrchu vrstvy.

Velikost částic sušeného materiálu zásadně ovlivňuje kontakt částic s otopnou plochou a tím zejména součinitel přestupu tepla z otopné plochy do materiálu  $h_f$  a dále tepelnou vodivost vrstvy materiálu. Zmenšením částic rostou oba zmíněné parametry.

Mícháním lze zajistit výrazné zlepšení prostupu tepla vrstvou sušeného materiálu díky dvěma hlavním aspektům. Jedním je přidané teplo do vrstvy vstupující z lopatek míchadla, druhým je promíchávání vrstvy suchých a vlhkých částic tak, že nedochází k izolaci vlhkých částic od otopné plochy již vysušenými částicemi.



Tyto závěry podkládám výpočtovými pokusy. Použitím vzorců z kapitoly 3.1, se zavedením zjednodušeného výpočtu  $\lambda_{bed}$ , jsem získal několik teoretických závislostí součinitele prostupu tepla  $U$  a tepelného toku  $Q$  na významných parametrech. Provedl jsem také rozbor zjednodušené tepelné vodivosti  $\lambda_{bed}$  v závislosti na změně obsahu vody v průběhu sušení.

Rozbor a výpočty jsou vztažené na rozměry experimentální sušárny FS ČVUT (popsané viz kapitola (4.1)) a materiál používaný v experimentech: Zaplnění 10 %  $V = 51,3$  l; průměr  $D = 0,26$  m; délka  $L = 1$  m; kontaktní plocha  $A = 0,211$  m<sup>2</sup>; otáčky míchadla  $n = 17$  min<sup>-1</sup>; teplota otopu  $T = 130$  °C. Velikost částic  $d = 0,02$  m.

- Rozbor  $\lambda_{bed}$  dřevní štěpky

Využiji zjištěných údajů z jednoho z provedených experimentů pro upřesnění některých údajů.

Tabulka 3.3-1 - Parametry sušeného lože

Zaplnění 10 % V	0,00513 m <sup>3</sup>
Vsázka experimentu	2,008 kg
$\lambda_{dřevo}$	0,27 W/m <sup>2</sup> K
$\lambda_{voda}$	0,59 W/m <sup>2</sup> K
$\lambda_{vzduch}$	0,024 W/m <sup>2</sup> K
$\rho_{dřevo}$	500 kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{voda}$	1000 kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{vzduch}$	1 kg/m <sup>3</sup>
Obsah vody W	0,505
mezerovitost	0,4

Tabulka 3.3-2 - Výpočty pro sušené lože

Obj. vzduchu	$V_{vzd} = 0,4 * V = 0,002053 \text{ m}^3$
Hm. vzduchu	$m_{vzd} = \rho_{vzd} * V_{vzd} = 0,002053 \text{ kg}$
Obj. štěpky	$V_{mat} = V - V_{vzd} = 0,003078 \text{ m}^3$
Hm. štěpky	$m_{mat} = \frac{V_{mat} * \rho_{dřevo} * \rho_{voda}}{\varphi * \rho_{dřevo} + (1 - \varphi) * \rho_{voda}}$ = 2,058863 kg
Hm. vody	$m_{voda} = m_{mat} * \varphi = 1,039726 \text{ kg}$
Hm. dřeva	$m_{dřevo} = m_{mat} * (1 - \varphi) = 1,019137 \text{ kg}$
Podíl vzduchu	$x = 0,000996$
Podíl vody	$y = 0,504497$
Podíl dřeva	$z = 0,494507$

Z uvedených výpočtů vypočtu teoretickou teplotní vodivost sušeného lože

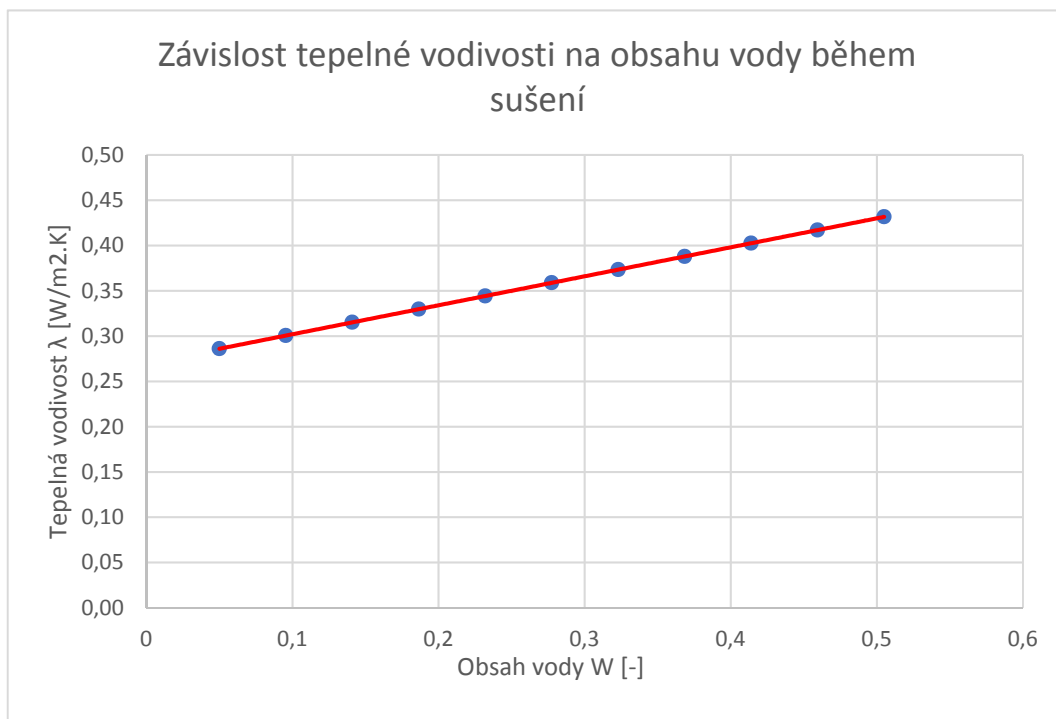
$$\lambda_{bed} = \lambda_{vzduch} * x + \lambda_{voda} * y + \lambda_{dřevo} * z = 0,43119 W/m^2K.$$

- Vliv snížení obsahu vody ve štěpce během sušení

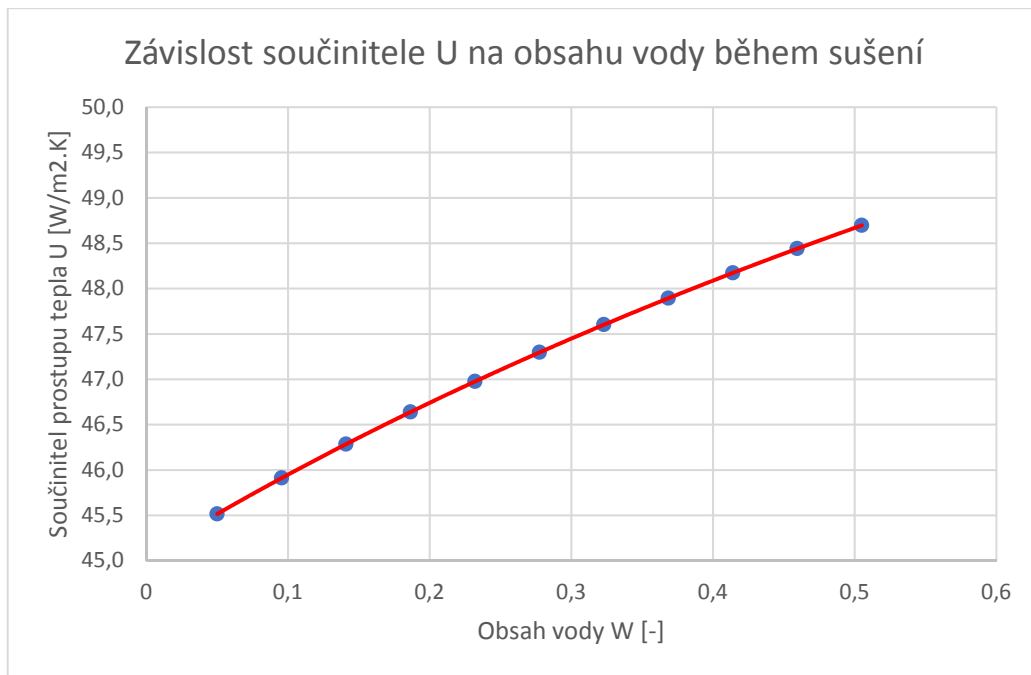
V průběhu sušení dochází k úbytku vody. Množství dřeva a uvažovaného vzduchu ve vrstvě zůstává konstantní. Mění se tedy ve výpočtu  $\lambda_{bed}$  podíl vody a podíl dřeva. To má za následek pokles tepelné vodivosti  $\lambda_{bed}$ , součinitele prostupu tepla a tepelného toku.

Tabulka 3.3-3 - Závislost tepelné vodivosti, souč. prostupu tepla a tepelného toku na úbytku vody

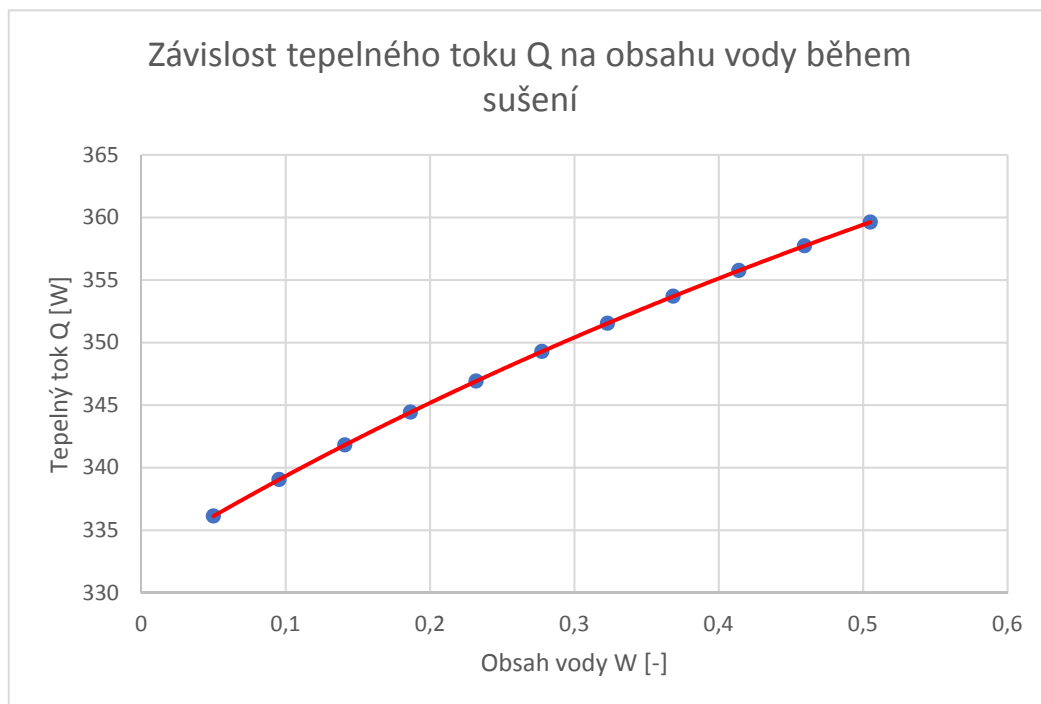
Hm. vsázky m	Obsah vody W	Hm. vody	Podíl vody	Podíl dřeva	$\lambda_{bed}$	U	Q
2,058863	0,505	1,0397	0,505	0,495	0,4316	48,696	359,622
1,885545	0,4595	0,8664	0,460	0,541	0,4171	48,440	357,729
1,739142	0,414	0,7200	0,414	0,586	0,4025	48,173	355,754
1,613836	0,3685	0,5947	0,369	0,632	0,3879	47,894	353,694
1,505372	0,323	0,4862	0,323	0,677	0,3734	47,602	351,539
1,41057	0,2775	0,3914	0,278	0,723	0,3588	47,296	349,284
1,327001	0,232	0,3079	0,232	0,768	0,3443	46,976	346,918
1,252781	0,1865	0,2336	0,187	0,814	0,3297	46,639	344,432
1,186423	0,141	0,1673	0,141	0,859	0,3151	46,285	341,815
1,126741	0,0955	0,1076	0,096	0,905	0,3006	45,911	339,054
1,072776	0,05	0,0536	0,050	0,950	0,2860	45,516	336,134



Obrázek 3.3-1 - Závislost tepelné vodivosti na obsahu vody



Obrázek 3.3-2 - Závislost součinitele  $U$  na obsahu vody



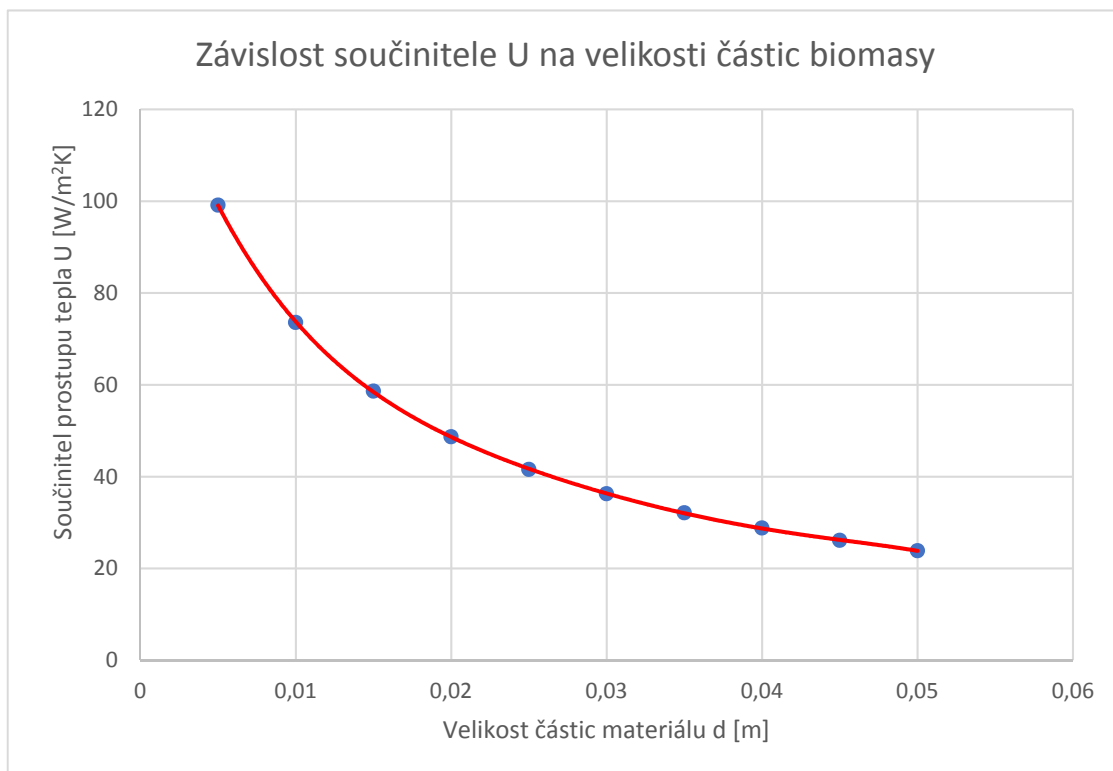
Obrázek 3.3-3 - Závislost tepelného toku  $Q$  na obsahu vody

- Vliv velikosti částic dřeva

Jako částice dřeva uvažujeme zjednodušeně částice kulového tvaru o rozměru 50 mm – 5 mm. Z kapitoly 3.1 části pro výpočet  $h_f$  uvedeme, že faktor pokrytí desky  $\varphi_A$ , který je uvažován 0,8, se musí při zmenšování částic blížit k 1. Údaje jsou pro obsah vody na vstupu  $W = 0,505$ .

Tabulka 3.3-4 - Závislost součinitele  $U$  na velikosti částic biomasy

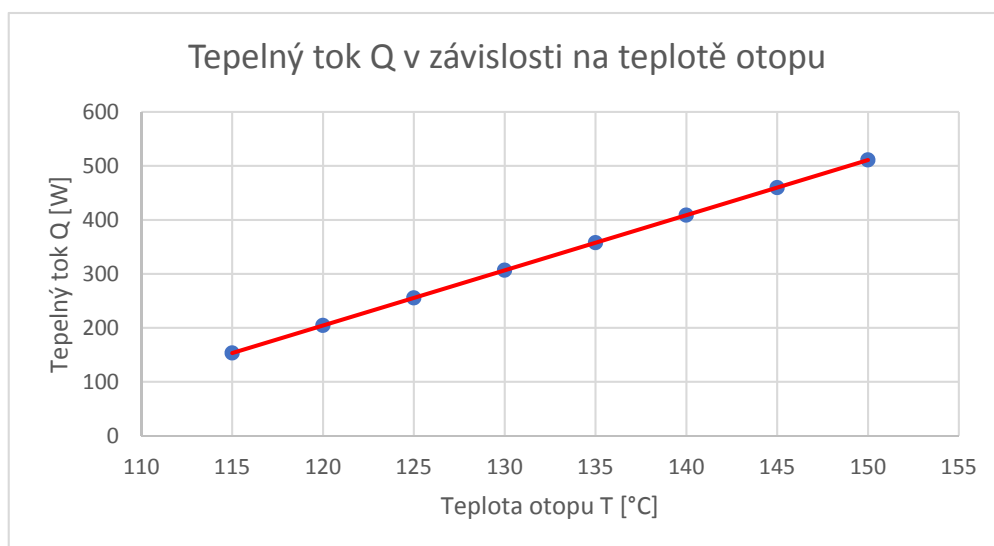
Rozměr částice	$\varphi_A$	$h_{fp}$	$h_f$	$U$
0,05	0,8	34,8993736	28,09712	23,88011169
0,045	0,807	38,48301043	31,24624	26,11725205
0,04	0,815	42,92355019	35,18807	28,81533773
0,035	0,824	48,57630218	40,25017	32,12373196
0,03	0,834	56,02697994	46,97222	36,26578386
0,025	0,845	66,31640057	56,31268	41,59212926
0,02	0,857	81,49417426	70,15801	48,68890671
0,015	0,87	106,250074	92,82242	58,62255994
0,01	0,884	154,2825652	136,9009	73,58582559
0,005	0,9	291,1538247	262,9266	99,12410813



Obrázek 3.3-4 - Závislost součinitele  $U$  na velikosti částic biomasy

- Změna teploty otápné plochy

Změna teploty vede pouze k lineární změně tepelného toku  $Q$ .



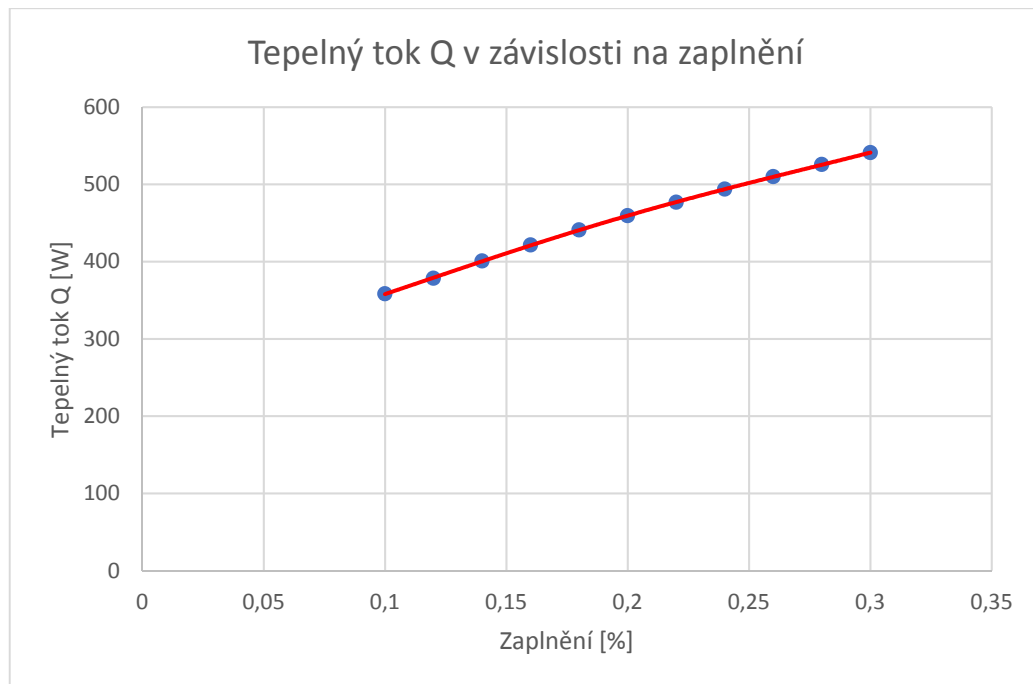
Obrázek 3.3-5 - Závislost tepelného toku  $Q$  na teplotě otopu

- Změna zaplnění

Pro stávající sušárnu (experimentální FS ČVUT) o objemu  $V = 0,0513 \text{ m}^3$  a průměru  $D = 0,24 \text{ m}$  dochází při změně zaplnění k pokrytí větší plochy ohřivané stěny. Zaplnění sušárny je zjednodušeně popsateľné úsečí kruhu. Z ní vychází závislost délky oblouku úseče na jejím obsahu. S rostoucím zaplněním klesá přírůstek na délce oblouku, a proto růst tepelného toku  $Q$  není lineární.

Tabulka 3.3-5 - Závislost tepelného toku  $Q$  na zaplnění

Zaplnění	Objem	Plocha A	Q
0,1	0,00513	0,211464092	358,3756
0,12	0,006156	0,223262518	378,3708
0,14	0,007182	0,236490368	400,7885
0,16	0,008208	0,248674512	421,4374
0,18	0,009234	0,260155288	440,8943
0,2	0,01026	0,271046142	459,3514
0,22	0,011286	0,281347075	476,8087
0,24	0,012312	0,291330359	493,7277
0,26	0,013338	0,300859856	509,8777
0,28	0,014364	0,310162461	525,6432
0,3	0,01539	0,319238173	541,0241

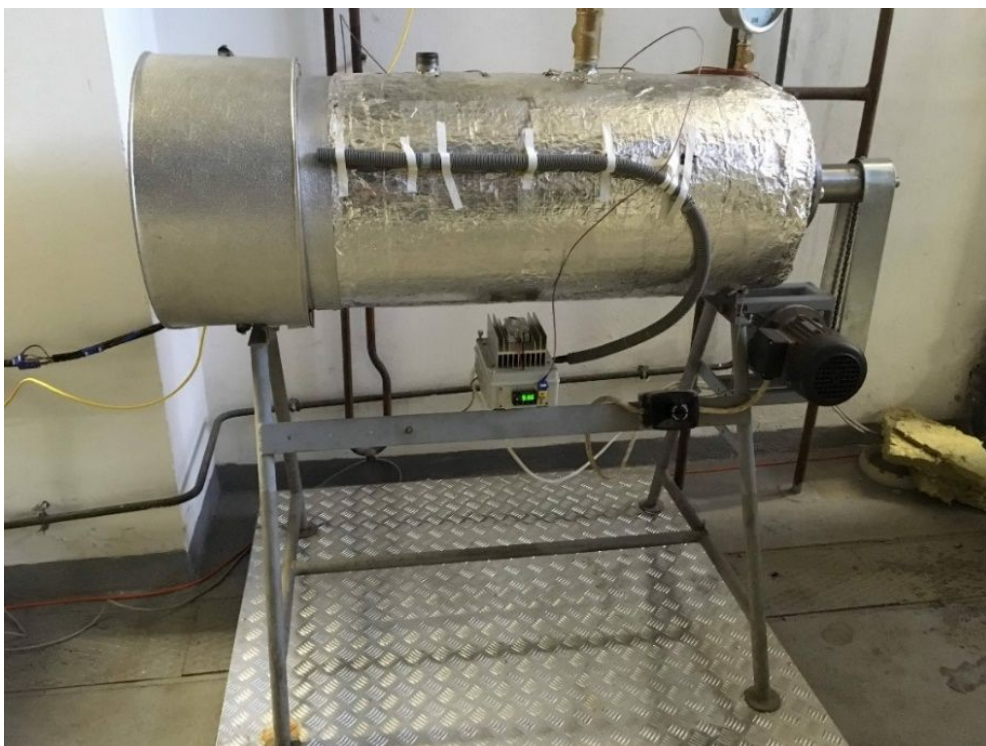


Obrázek 3.3-6 - Závislost tepelného toku  $Q$  na zaplnění

Zde je ale třeba zdůraznit, že tato teoretická závislost vychází pouze ze zvětšení kontaktní plochy. Při zvyšujícím se zaplnění ale roste tloušťka vrstvy a ta nepříznivě ovlivňuje součinitel prostupu tepla  $U$  ve vrstvě. Kvůli složitosti těchto závislostí a výpočtů nebudeme tento vliv uvažovat, dá se ale předpokládat, že by výrazně snížil zisk na tepelném toku  $Q$ , ne-li trend otočil.

## 4. Experimenty provedené na kontaktní sušárně FS ČVUT

### 4.1. Popis měření na kontaktní sušárně ČVUT

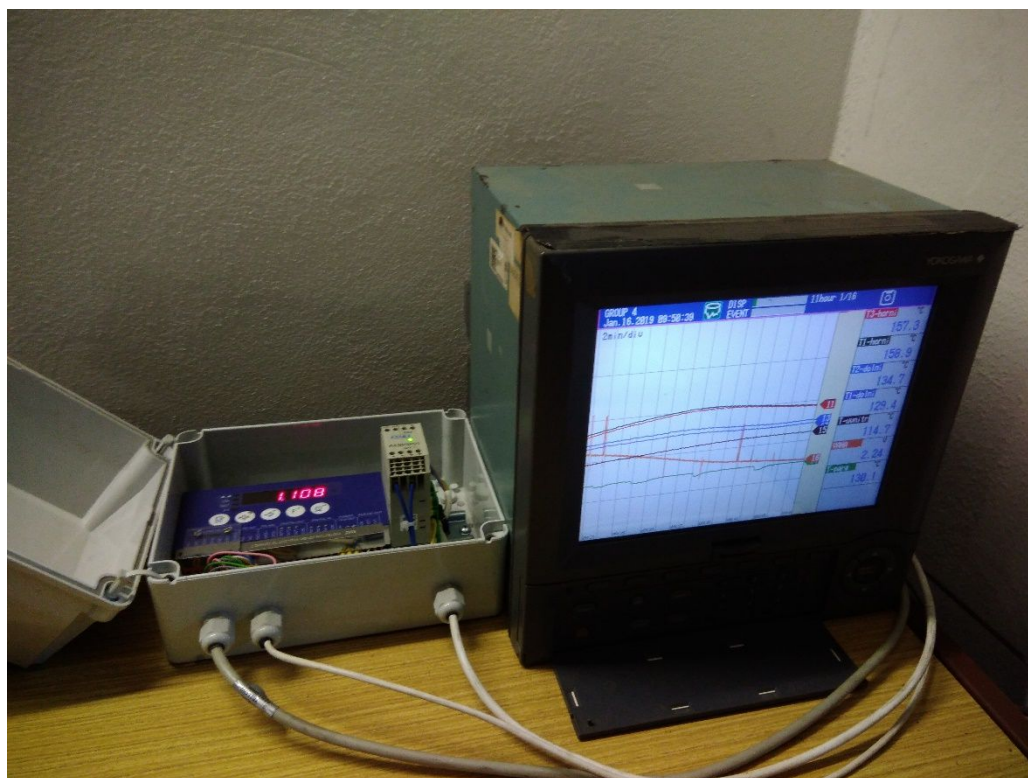


Obrázek 4.1-1 - Kontaktní sušárna ČVUT FS

Kontaktní sušárna (obr. 4.1-1) sestavená v prostorech experimentální haly FS ČVUT Ústavu energetiky na Julisce slouží k výuce a experimentům tohoto ústavu. Její sestavení a měření na ní probíhající jsou pod záštitou doc. Ing. T. Dlouhého, CSc. a Ing. J. Havlíka, Ph.D. Měření se spoluúčastnili Ing. Jan Havlík, Ph.D, Bc. Jakub Mertl, Bc. Vojtěch Dlouhý, Ing. Michel Sabatini.

Konstrukčně je nejbližší lopatkovým sušárnám. Jedná se o vsázkovou sušárnu s míchadlem a otop je proveden konduktivně pomocí odporově elektricky ohřívaného pláště. Buben sušárny je opatřen izolací ze skelné vlny ke snížení tepelných ztrát do okolí. Do bubnu je zavedeno několik termočlánků pro měření teploty otápné plochy, vsázky a páry odcházející ze sušárny a také termočlánek pro nastavení teploty otopu pomocí PID regulátoru. Sušárna je dále opatřena dvěma otvory ve své horní části, které slouží k plnění sušárny bez nutnosti odnímat izolaci a otevírat sušárnu a k odvodu vznikající páry. Pro jiná měření je možno připojit uzavírací kohouty spolu s odvodem páry vývěvou pro zajištění vakuového sušení. Čelní strana sušárny je opatřena odnímatelným víkem. Otvor slouží k vyjmutí vsázky, k demontáži míchadla a čištění sušárny.

Prostor sušárny je dále opatřen tenzometrickou váhou umístěnou pod sušárnou. Ta je propojena s měřicí stanicí (obr. 4.1-2), ke které jsou připojeny také výstupy z termočlánků. Pomocí měřicí stanice je možno v reálném čase odečítat hodnoty teplot a hmotnosti vsázky a tím určit závislost obsahu vody na čase.



Obrázek 4.1-2 - Měřicí stanice s displejem tenzometrické váhy

Parametry experimentální sušárny jsou:

Tabulka 4.1-1 - Rozměry experimentální sušárny

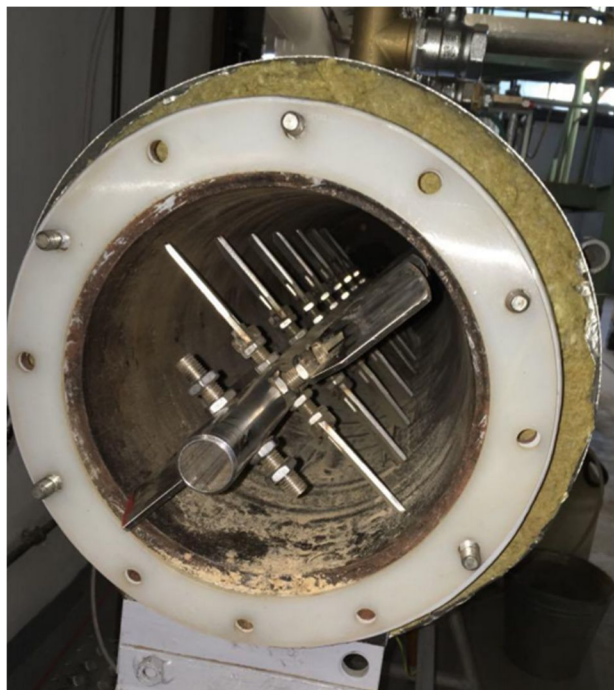
Průměr bubnu D [ m ]	0,26
Délka bubnu L [ m ]	1
Vnitřní otápěná plocha S [ m <sup>2</sup> ]	0,817
Objem sušárny V [ m <sup>3</sup> ]	0,0531

- Průběh měření

Na počátku měření jsme nastavili na termostatu požadovanou teplotu pro otop. Po nastavení teploty a spuštění nahřívání jsme do vyčištěného prostoru sušárny umístili míchadlo (obr. 4.1-3), sušárnu jsme uzavřeli víkem a zakryli izolací.



Po přípravě sušárny k měření jsme spustili měřicí stanici a započali přípravu sušeného materiálu. Sušili jsme mulčovací kůru (obr. 4.1-4) a rybí krmivo. Materiál jsme používali v různých úpravách pro jednotlivá měření. Bylo užíváno kůry a krmiva přímo z pytle, kůry drcené pomocí drtiče na větve a kůry v obou provedeních se zvýšenou vlhkostí. Materiál jsme nabírali pomocí kovové lopatky (obr. 4.1-5) a množství jsme podle požadovaného zaplnění pro měření odměřovali pomocí nádoby, na které jsme si prvně vyznačili odpovídající objem (obr. 4.1-6).



*Obrázek 4.1-3 - Pohled do sušárny s míchadlem*



*Obrázek 4.1-5 - Mulčovací kůra*



*Obrázek 4.1-4 - Nabírání mulčovací kůry*



*Obrázek 4.1-6 - Nádoba pro odměřování požadovaného množství pro plnění*

Takto odměřené množství materiálu bylo pomocí tenzometrické váhy zváženo a připraveno k sušení. Po nahřátí sušárny jsme odečetli hodnotu na elektroměru (obr. 4.1-7), přes který je připojený otop, a začali jsme sušárnu plnit pomocí jednoho z otvorů na vršku sušárny, na který byl připevněn trychtýř. Plnění tímto otvorem bylo obtížné díky charakteru mulčovací kůry, proto byla pro každé měření odečtena doba plnění, během které nedochází k plnohodnotnému sušení.



*Obrázek 4.1-7 - Elektroměr pro elektrický ohřev sušárny*

Během sušení jsme sledovali na měřící stanici a digitálním displeji tenzometrické váhy pokles hmotnosti. Ta definuje přímo úbytek vody ve vsázce. Hodnoty jsme odečítali každých 5 minut, zpočátku měření i častěji. Čím nižší byl podíl vody ve vsázce, tím se sušení zpomalovalo. Po vysušení vsázky na obsah několika procent, bylo sušení ukončeno. Po ukončení sušení jsme odečetli novou hodnotu na elektroměru a tím určili elektrickou spotřebu pro dané sušení, odejmuli jsme krycí izolaci víka a víko odmontovali, vysunuli míchadlo a vyjmuli vysušený materiál. Ihned byl materiál znovu zvážen, v totožné nádobě jako na počátku měření, a byly odebrány nové vzorky pro laboratorní určení výstupního obsahu vody.

Vstupní i výstupní obsah vody jsme měřili laboratorně pomocí přesné digitální váhy, keramických misek (obr. 4.1-8) a pece (obr. 4.1-9). Nejdříve došlo k odebrání 4 vzorků o hmotnosti několika gramů na keramické misky z odpovídajícího množství materiálu (určené k sušení a vysušené ze sušárny). Ty byly následně vloženy do pece nahřáté na 115 °C. Po 60 minutách byly vzorky vyjmuty z pece a převáženy. Neboť se při této metodě určování obsahu vody považuje vzorek za 60 minut zcela vysušen, lze jednoduchým výpočtem zjistit vstupní obsah vody vzorku. Takto zjištěný obsah vody je brán jako referenční i při samotném experimentu na sušárně.



*Obrázek 4.1-8 - Vzorky pro laboratorní zjištění obsahu vody*



Obrázek 4.1-9 - Laboratorní pec s umístěnými vzorky

Na obrázku 4.1-10 můžeme vidět vizuální srovnání suché a mokré mulčovací kůry nedrcené.



Obrázek 4.1-10 - Srovnání suché a vlhké mulčovací kůry nedrcené

## 4.2. Vyhodnocované kombinace parametrů sušárny

Tabulka 4.2-1 - Experimenty sušení mulčovací kůry vlhčené

Měření	Teplota otopu [°C]	Zaplnění [%]	Vysušení [%]
I	115	10	4,4
II	130	10	1,9
III	145	10	2,9
IV	130	10	5,9
V	130	20	4,6
VI	130	30	3,6

Tabulka 4.2-2 - Experimenty sušení mulčovací kůry nevlhčené

Měření	Teplota otopu [°C]	Zaplnění [%]	Vysušení [%]	Podmínky
VII	130	10	18	bez míchání, nedrcené
VIII	130	10	5,1	s mícháním, nedrcené
IX	130	10	1,5	s mícháním, drcené

Tabulka 4.2-3 - Experimenty sušení krmných granulí

Měření	Teplota otopu [°C]	Zaplnění [%]	Tlak [bar]	Vysušení [%]
A	95	15	0,1	10,8
B	110	15	0,2	13,2
C	110	30	0,2	9,2
D	110	45	0,2	7,1
E	90	15	0,2	12,6
F	110	15	0,2	9,8
G	130	15	0,2	7,8
H	130	15	0,475	7,7

### 4.3. Naměřená data a jejich vyhodnocení

#### Dřevní štěpka

- I. Měření – míchaná vrstva, 10% zaplnění, 115 °C, doba sušení T = 50 min,  
plnění T<sub>p</sub> = 3 min

Stav mulčovací kůry před sušením: vlhčená, drcená

Měření vstupního obsahu vody:

č. misky	hm. misky [g]	hm. misky+biom. před [g]	hm. misky+biom. po [g]
11	39,295	52,867	45,967
12	39,251	52,150	45,479
15	42,231	56,096	49,280
10	45,610	58,024	51,771

$$W_i = \frac{m_{\text{před};i} - m_{\text{po};i}}{m_{\text{před};i} - m_{\text{miska}}} \quad | \quad W_{11} = \frac{52,867 - 45,967}{52,867 - 39,295} = 0,508 [-]$$

č. misky	W
11	0,508
12	0,517
15	0,492
10	0,504

Průměr dílčích hodnot mi dává vstupní obsah vody v biomase pro sušení v sušárně

$$W_{I \text{ před}} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{4} = \frac{0,508 + 0,517 + 0,492 + 0,504}{4} = 0,505 [-]$$

Po sušení materiálu v sušárně proběhlo stejné kontrolní měření pro zjištění výstupního obsahu vody:

č. misky	hm. misky [g]	hm. misky+biom. před [g]	hm. misky+biom. po [g]
1	45,208	56,634	55,611
4	45,184	55,843	55,311
0	46,967	56,162	55,806
6	43,057	53,908	53,368

č. misky	W
1	0,090
4	0,050
0	0,039
6	0,050

$$W_{Ipo} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{4} = \frac{0,090 + 0,050 + 0,039 + 0,050}{4} = 0,057 [-]$$

Naměřená a odečtená data při sušení na sušárně:

parametr	před sušením	po sušení
hm. kýble + vsázky [kg]	3,048	2,152
hm. kýble [kg]	1,040	1,040
stav elektroměru [kWh]	0,14	1,01
hm. biomasy [kg]	3,048 – 1,040 = 2,008	2,152 – 1,040 = 1,112

Obsah vody vsázky dle vstupního měření je  $W_I = 0,505$ . Z toho vyplývá obsah sušiny  $m_{suš}$  a vody  $m_w$  vsázky.

$$m_w = W_{I\text{ před}} * m_{bio\text{ před}} = 0,505 * 2,008 = 1,014 \text{ kg}$$

$$m_{suš} = (1 - W_{I\text{ před}}) * m_{bio\text{ před}} = 0,994 \text{ kg}$$

Dle známého množství sušiny v mokré biomase získáme aktuální obsah vody pro každé měření hmotnosti. Na výstupu má biomasa obsah vody dle následujícího.

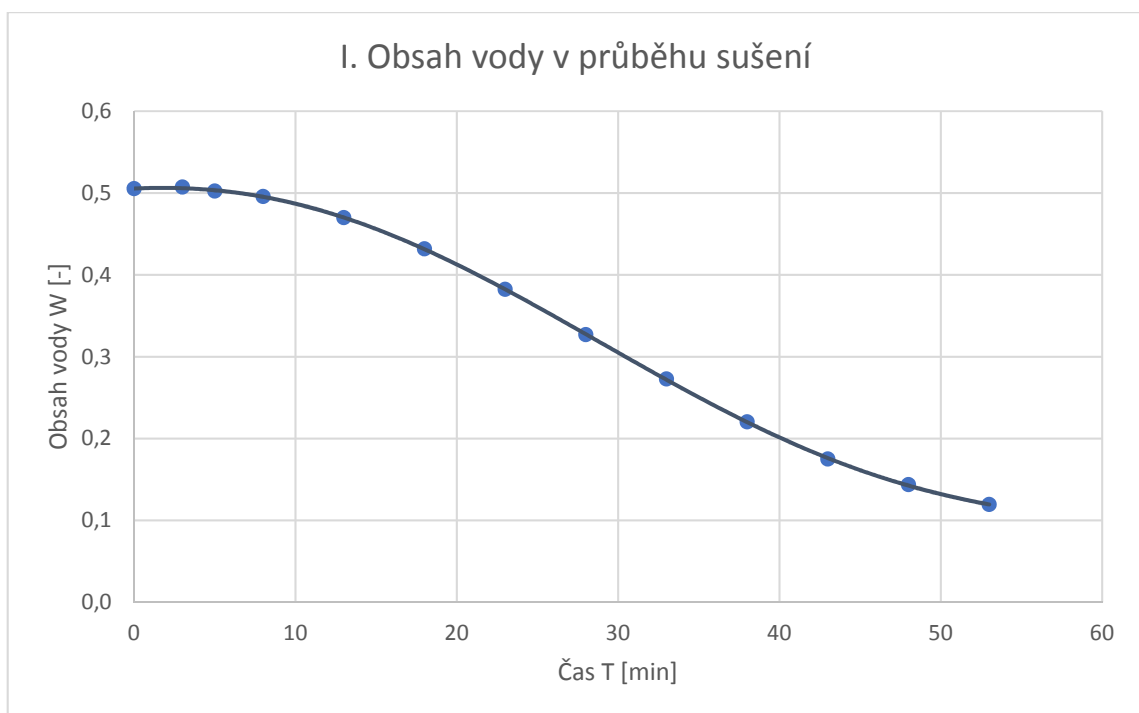
$$W'_{Ipo} = \frac{m_{bio\text{ po}} - m_{suš}}{m_{bio\text{ po}}} = \frac{1,112 - 0,994}{1,112} = 0,107 [-]$$

Hodnoty zaznamenané v průběhu měření

t [min]	m [kg]	W [-]
0	2,008	0,505
3	2,016	0,507
5	1,996	0,502
8	1,970	0,496
13	1,874	0,470
18	1,748	0,432
23	1,608	0,382
28	1,476	0,327

33	1,366	0,273
38	1,274	0,220
43	1,204	0,175
48	1,160	0,144
53	1,128	0,119

Z těchto dat můžeme sestavit graf názorně zobrazující průběh sušení, tedy obsah vody v biomase v průběhu sušení. Počáteční linie na grafu je zkruslena vlivem počínajícího sušení během plnění, které probíhalo 3 minuty.



Obrázek 4.3-1 - Sušící křivka měření I

Energetická spotřeba při měření:

$$E_{el} = E_{el\ po} - E_{el\ před} = 1,01 - 0,14 = 0,87\ kWh$$

Energetická náročnost sušení, tedy spotřeba elektrické energie vztážená na kg odpařené vody za hodinu:

$$E_{el/kg_w} = \frac{E_{el}}{m_w - m_{bio\ po} + m_{suš}} \frac{60}{T} = \frac{0,87}{1,014 - 1,112 + 0,944} \frac{60}{50} = 1,165\ kWh/kg_w$$

$$E = E_{el/kg_w} * 3600 = 4194,643\ kJ/h.kg_w$$



Sušárna se pro pracovní parametry dá popsat pomocí měrné odpařivosti vztažené na plochu a na objem sušárny. Neboli množství vody odpařené na otápné ploše o rozměru  $S$  [ $m^2$ ] a objemu  $V$  [ $m^3$ ]. Vypočtená hodnota odpovídá odpařené vodě za dobu sušení, musí být přepočtena na odpařivost za hodinu. Odpařivost je vypočítávána v intervalu od konce plnění do snížení obsahu vody na přibližně 20 %.

$$\dot{m}_S = \frac{m_T - m_{0,2}}{S} \frac{60}{T} = \frac{2,016 - 1,274}{0,817} \frac{60}{35} = 1,557 \text{ kg}_w/h.m^2$$

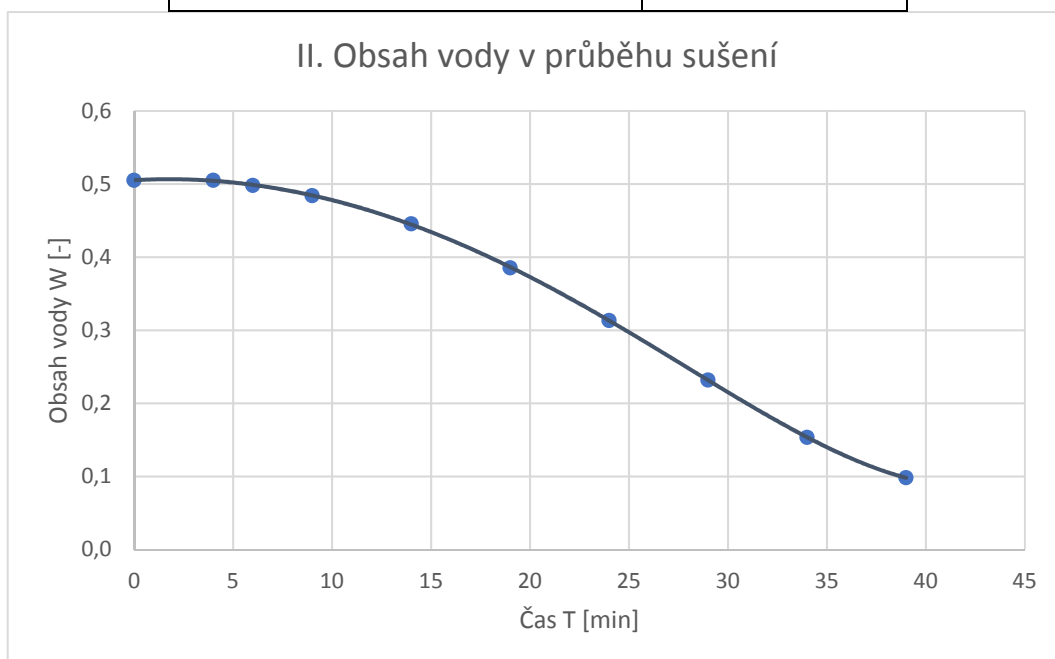
$$\dot{m}_V = \frac{m_T - m_{0,2}}{V} \frac{60}{T} = \frac{2,016 - 1,274}{0,0531} \frac{60}{35} = 23,955 \text{ kg}_w/h.m^3$$

- II. Měření – míchaná vrstva, 10% zaplnění, 130 °C, doba sušení  $T = 35$  min, plnění  $T_p = 3$  min

Stav mulčovací kůry před sušením: vlhčená, drcená

Vstupní obsah vody [-]	0,505
Hm. vsázky [kg]	2,012
Doba plnění [min]	4

Výstupní obsah vody [-]	0,071
Energetická spotřeba [kJ/h.kg <sub>w</sub> ]	7547,31
Plošná odpařivost [kg <sub>w</sub> /h.m <sup>2</sup> ]	2,103
Objemová odpařivost [kg <sub>w</sub> /h.m <sup>3</sup> ]	32,362



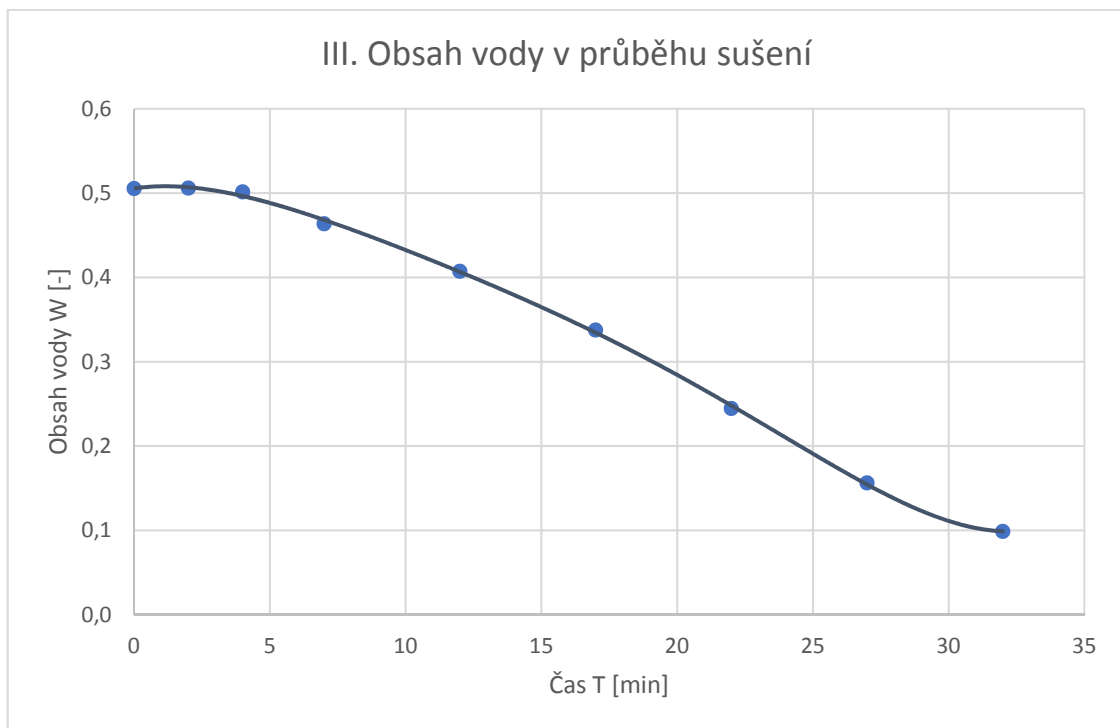
Obrázek 4.3-2 - Sušící křivka měření II

III. Měření – míchaná vrstva, 10% zaplnění, 145 °C, doba sušení T = 30 min,  
plnění T<sub>p</sub> = 2 min

Stav mulčovací kůry před sušením: vlhčená, drcená

Vstupní obsah vody [-]	0,505
Hm. vsázky [kg]	1,982
Doba plnění [min]	2

Výstupní obsah vody [-]	0,038
Energetická spotřeba [kJ]	9290,32
Plošná odpařivost [kg <sub>w</sub> /h.m <sup>2</sup> ]	2,519
Objemová odpařivost [kg <sub>w</sub> /h.m <sup>3</sup> ]	38,757



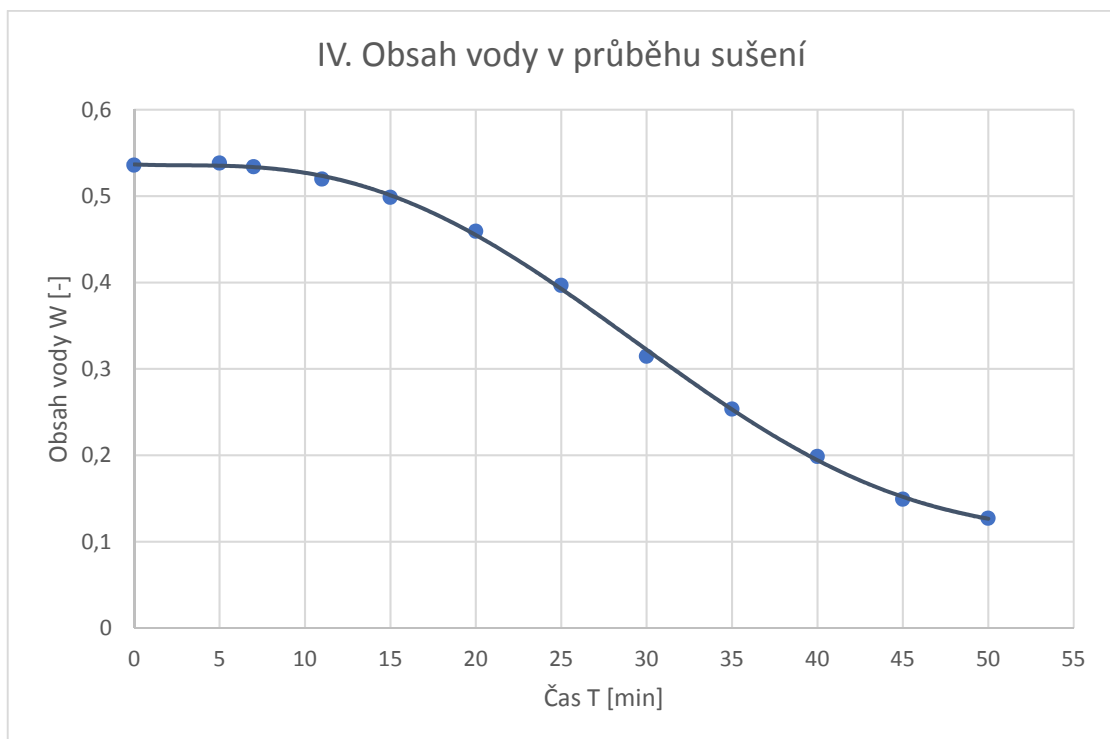
Obrázek 4.3-3 - Sušící křivka měření III

IV. Měření – míchaná vrstva, 10% zaplnění, 130 °C, doba sušení T = 45 min,  
plnění  $T_p = 5$  min

Stav mulčovací kůry před sušením: vlhčená, drcená

Vstupní obsah vody [-]	0,536
Hm. vsázky [kg]	2,020
Doba plnění [min]	5

Výstupní obsah vody [-]	0,075
Energetická spotřeba [kJ]	6519,11
Plošná odpařivost [ $\text{kg}_w/\text{h} \cdot \text{m}^2$ ]	1,805
Objemová odpařivost [ $\text{kg}_w/\text{h} \cdot \text{m}^3$ ]	27,764



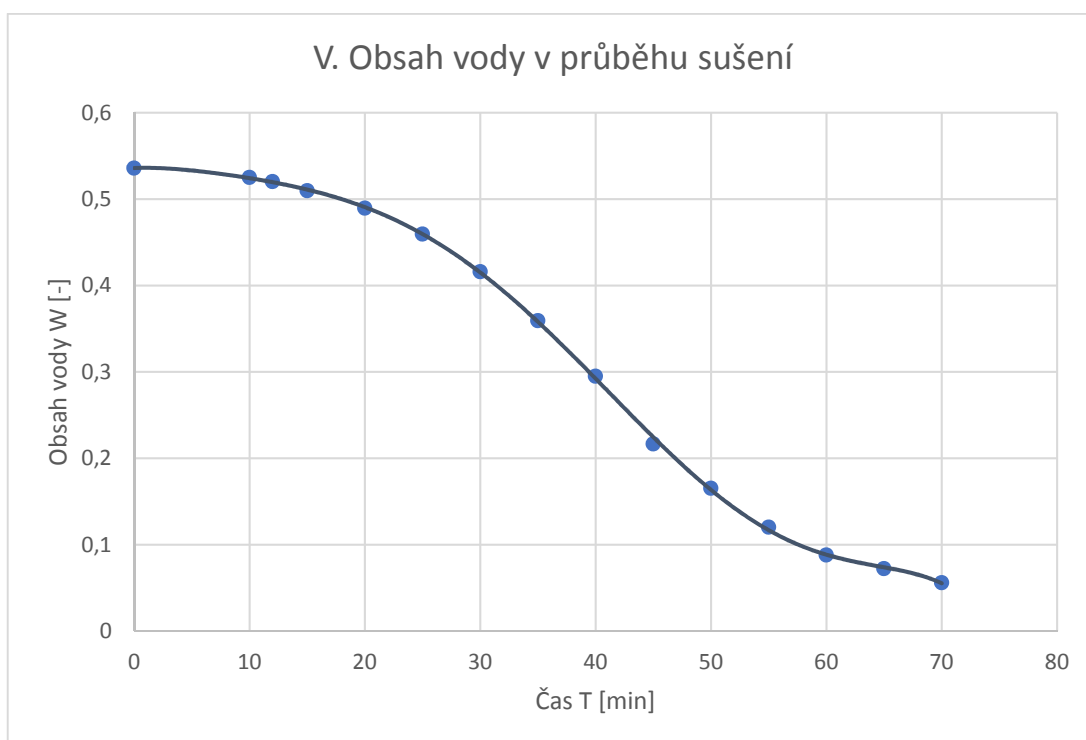
Obrázek 4.3-4 - Sušící křivka měření IV

V. Měření – míchaná vrstva, 20% zaplnění, 130 °C, doba sušení T = 60 min,  
plnění T<sub>p</sub> = 10 min

Stav mulčovací kůry před sušením: vlhčená, drcená

Vstupní obsah vody [-]	0,536
Hm. vsázky [kg]	3,946
Doba plnění [min]	10

Výstupní obsah vody [-]	0,028
Energetická spotřeba [kJ]	3900
Plošná odpařivost [kg <sub>w</sub> /h.m <sup>2</sup> ]	3,185
Objemová odpařivost [kg <sub>w</sub> /h.m <sup>3</sup> ]	49,007



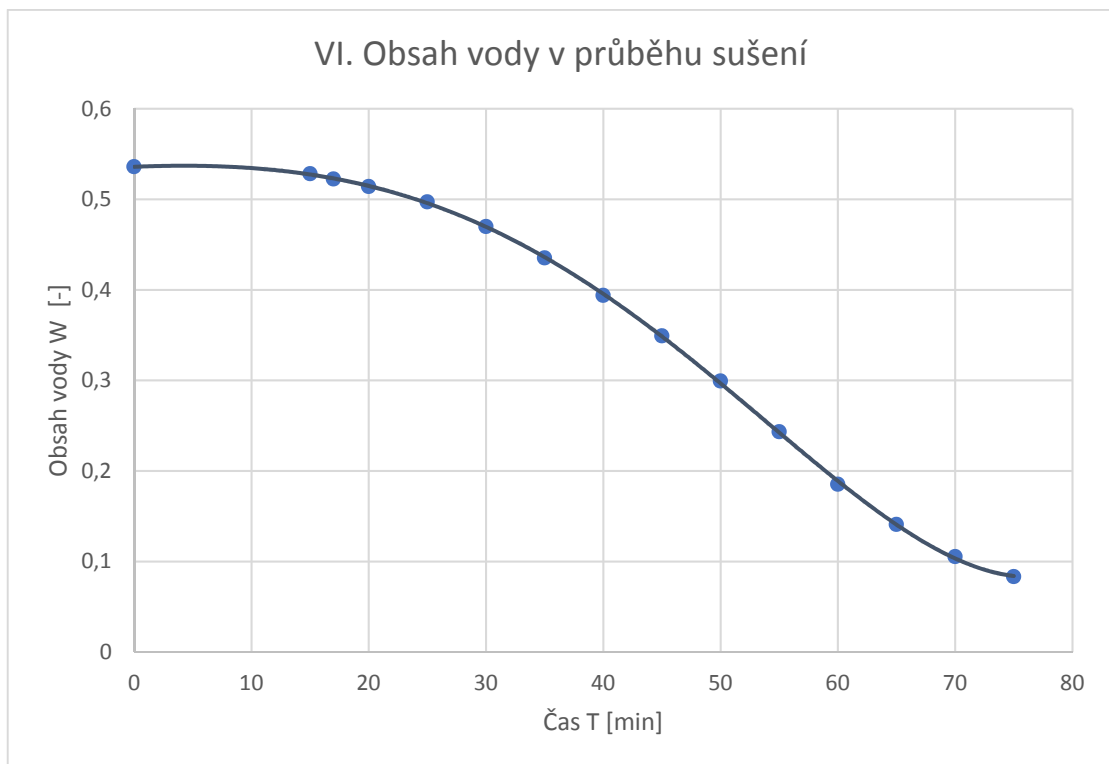
Obrázek 4.3-5 - Sušící křivka měření V

VI. Měření – míchaná vrstva, 30% zaplnění, 130 °C, doba sušení T = 60 min,  
plnění  $T_p = 15$  min

Stav mulčovací kůry před sušením: vlhčená, drcená

Vstupní obsah vody [-]	0,536
Hm. vsázky [kg]	2807,34
Doba plnění [min]	15

Výstupní obsah vody [-]	0,031
Energetická spotřeba [kJ]	9290,32
Plošná odpařivost [ $\text{kg}_w/\text{h.m}^2$ ]	3,776
Objemová odpařivost [ $\text{kg}_w/\text{h.m}^3$ ]	58,104



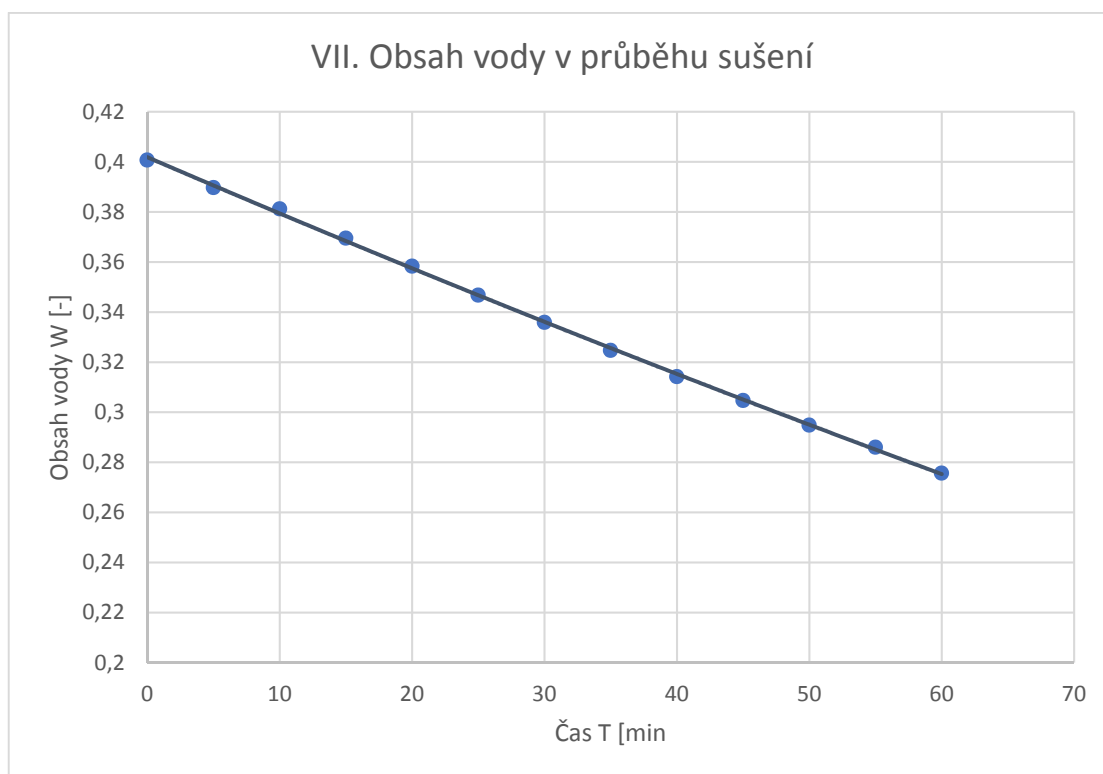
Obrázek 4.3-6 - Sušící křivka měření VI

VII. Měření – stacionární vrstva bez míchání, 10% zaplnění, 130 °C,  
 doba sušení T = 60 min

Stav mulčovací kůry před sušením: bez úpravy vlhkosti, bez drcení

Vstupní obsah vody [-]	0,385
Hm. vsázky [kg]	1,298
Doba plnění [min]	---

Výstupní obsah vody [-]	0,192
Energetická spotřeba [kJ]	---
Plošná odpařivost [ $\text{kg}_w/\text{h}\cdot\text{m}^2$ ]	0,323
Objemová odpařivost [ $\text{kg}_w/\text{h}\cdot\text{m}^3$ ]	4,972



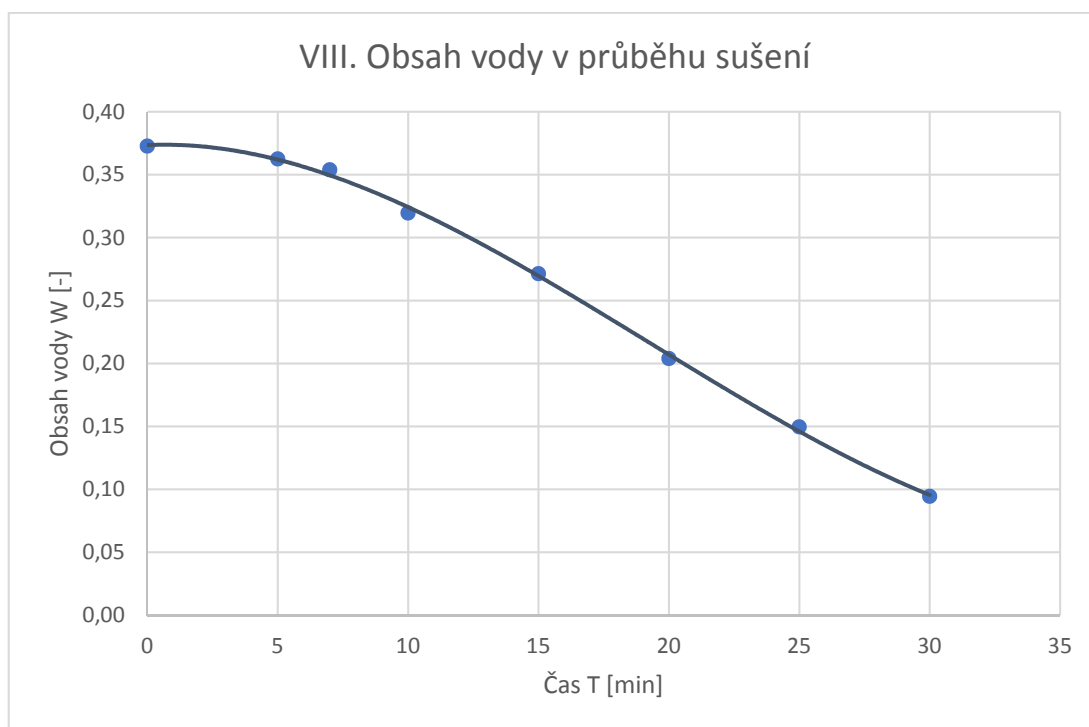
Obrázek 4.3-7 - Sušící křivka měření VII

VIII. měření – míchaná vrstva, 10% zaplnění, 130 °C, doba sušení T = 25 min, plnění  $T_p = 5$  min

Stav mulčovací kůry před sušením: bez úpravy vlhkosti, bez drcení

Vstupní obsah vody [-]	0,373
Hm. vsázky [kg]	1,510
Doba plnění [min]	5

Výstupní obsah vody [-]	0,115
Energetická spotřeba [kJ]	9777,778
Plošná odpařivost [ $\text{kg}_w/\text{h} \cdot \text{m}^2$ ]	1,366
Objemová odpařivost [ $\text{kg}_w/\text{h} \cdot \text{m}^3$ ]	21,017



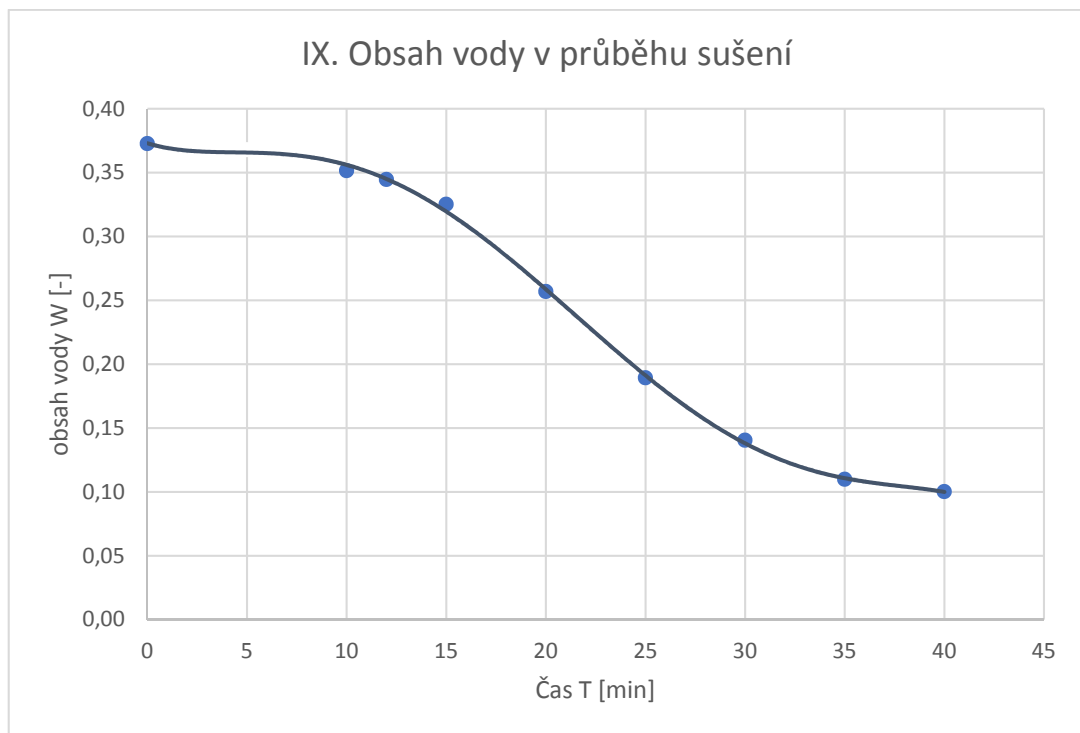
Obrázek 4.3-8 - Sušící křivka měření VIII

IX. měření – míchaná vrstva, 10% zaplnění, 130 °C, doba sušení T = 30 min,  
plnění  $T_p = 10$  min

Stav mulčovací kůry před sušením: bez úpravy vlhkosti, drcená

Vstupní obsah vody [-]	0,373
Hm. vsázky [kg]	1,592
Doba plnění [min]	10

Výstupní obsah vody [-]	0,035
Energetická spotřeba [kJ]	5557,895
Plošná odpařivost [ $\text{kg}_w/\text{h.m}^2$ ]	1,388
Objemová odpařivost [ $\text{kg}_w/\text{h.m}^3$ ]	21,356



Obrázek 4.3-9 - Sušící křivka měření IX

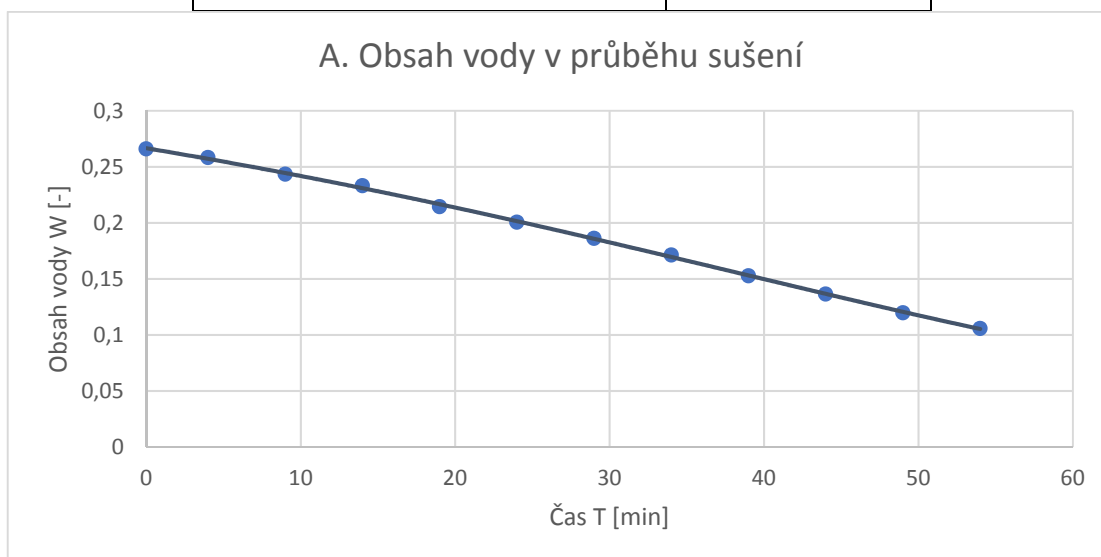


## Rybí krmivo – pro srovnání sušících křivek při použití rozdílného materiálu

A. Měření – míchaná vrstva, 15% zaplnění, 95 °C, doba sušení T = 50 minut, tlak p = 0,1 bar

Vstupní obsah vody [-]	0,266
Hm. vsázky [kg]	3,082
Doba plnění [min]	4

Výstupní obsah vody [-]	0,108
Energetická spotřeba [kJ]	5837,84
Plošná odpařivost [ $\text{kg}_w/\text{h.m}^2$ ]	0,808
Objemová odpařivost [ $\text{kg}_w/\text{h.m}^3$ ]	12,429

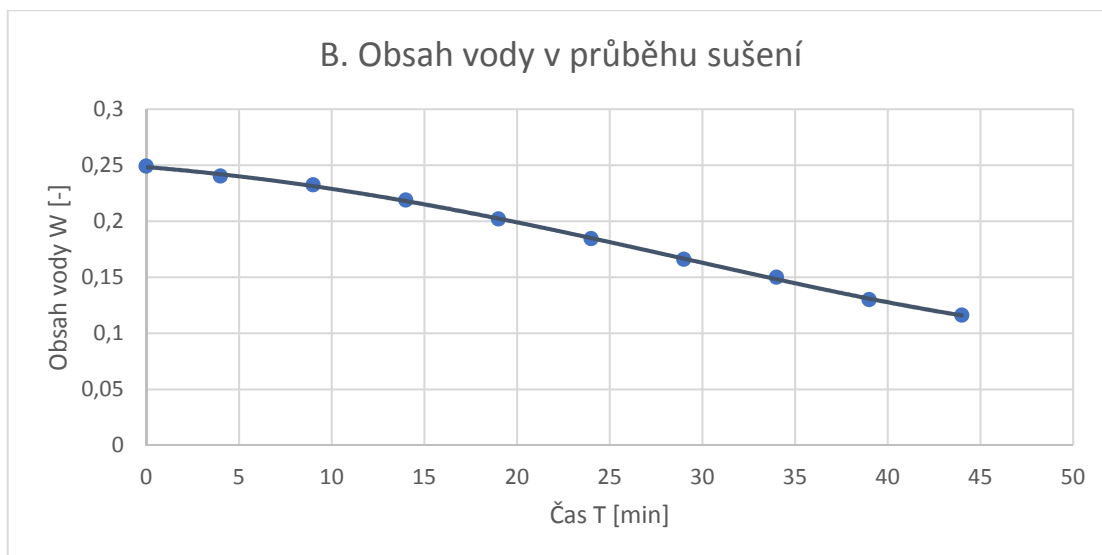


Obrázek 4.3-10 - Sušící křivka měření A

B. Měření – míchaná vrstva, 15% zaplnění, 110 °C, doba sušení T = 40 minut, tlak p = 0,2 bar

Vstupní obsah vody [-]	0,249
Hm. vsázky [kg]	2,954
Doba plnění [min]	4

Výstupní obsah vody [-]	0,132
Energetická spotřeba [kJ]	9642,86
Plošná odpařivost [ $\text{kg}_w/\text{h.m}^2$ ]	0,845
Objemová odpařivost [ $\text{kg}_w/\text{h.m}^3$ ]	12,994

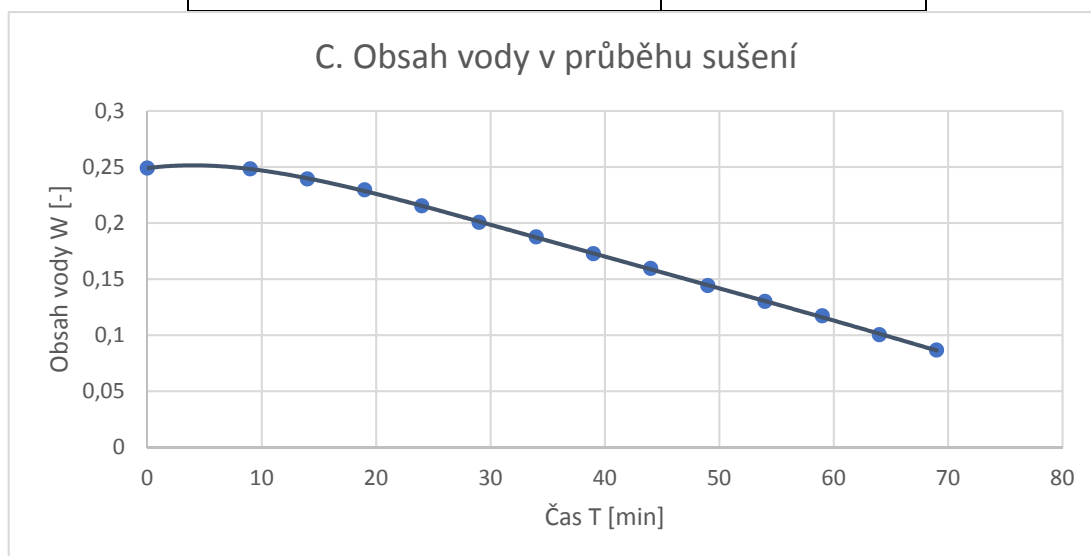


Obrázek 4.3-11 - Sušící křivka měření B

C. Měření – míchaná vrstva, 30% zaplnění, 110 °C, doba sušení T = 60 minut, tlak p = 0,2 bar

Vstupní obsah vody [-]	0,249
Hm. vsázky [kg]	5,966
Doba plnění [min]	9

Výstupní obsah vody [-]	0,092
Energetická spotřeba [kJ]	4936,01
Plošná odpařivost [kg <sub>w</sub> /h.m <sup>2</sup> ]	1,469
Objemová odpařivost [kg <sub>w</sub> /h.m <sup>3</sup> ]	22,599

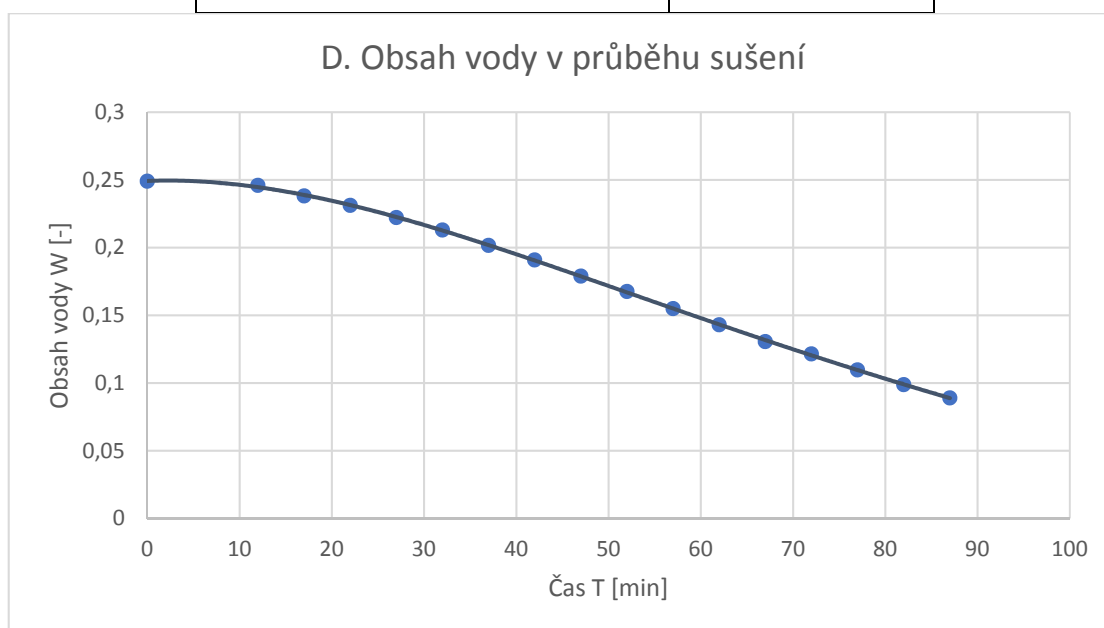


Obrázek 4.3-12 - Sušící křivka měření C

D. Měření – míchaná vrstva, 45% zaplnění, 110 °C, doba sušení T = 75 minut, tlak p = 0,2 bar

Vstupní obsah vody [-]	0,249
Hm. vsázky [kg]	8,856
Doba plnění [min]	12

Výstupní obsah vody [-]	0,071
Energetická spotřeba [kJ]	3687,81
Plošná odpařivost [kg <sub>w</sub> /h.m <sup>2</sup> ]	1,579
Objemová odpařivost [kg <sub>w</sub> /h.m <sup>3</sup> ]	24,294

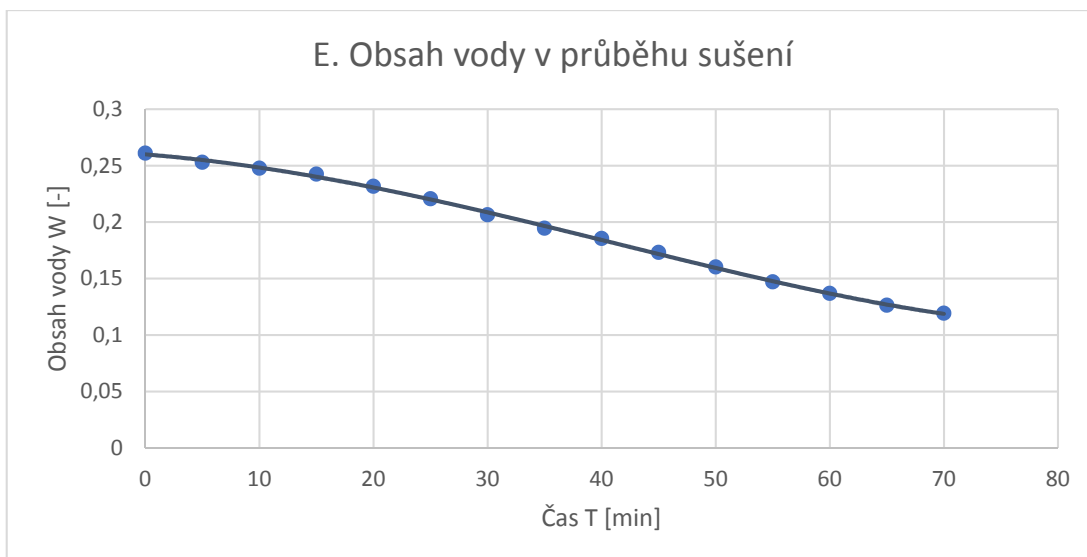


Obrázek 4.3-13 - Sušící křivka měření D

E. Měření – míchaná vrstva, 15% zaplnění, 90 °C, doba sušení T = 65 minut, tlak p = 0,2 bar

Vstupní obsah vody [-]	0,261
Hm. vsázky [kg]	2,932
Doba plnění [min]	5

Výstupní obsah vody [-]	0,126
Energetická spotřeba [kJ]	3628,64
Plošná odpařivost [kg <sub>w</sub> /h.m <sup>2</sup> ]	0,624
Objemová odpařivost [kg <sub>w</sub> /h.m <sup>3</sup> ]	9,605

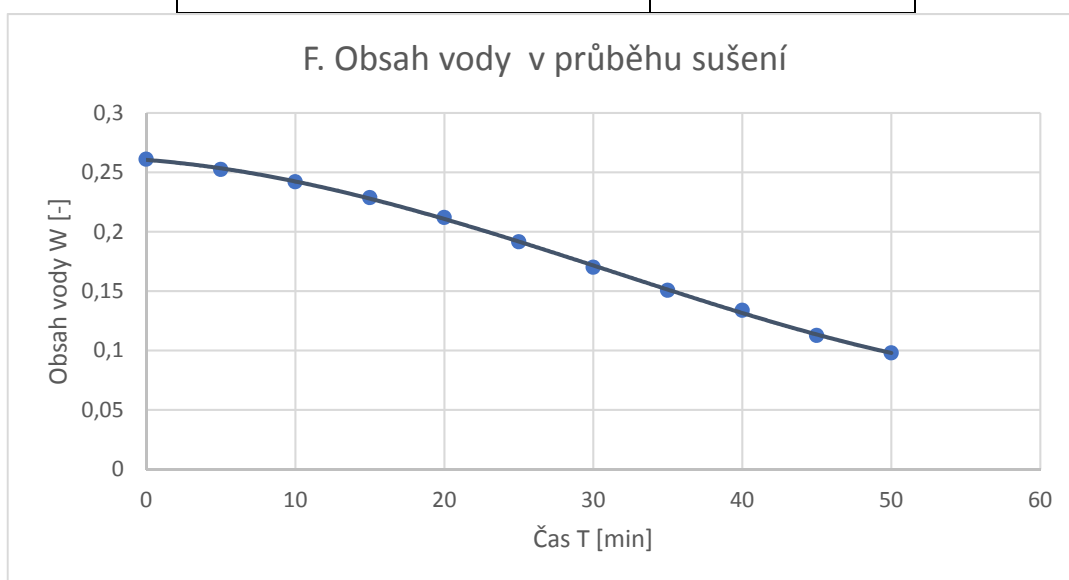


Obrázek 4.3-14 - Sušící křivka měření E

F. Měření – míchaná vrstva, 15% zaplnění, 110 °C, doba sušení T = 45 minut, tlak p = 0,2 bar

Vstupní obsah vody [-]	0,261
Hm. vsázky [kg]	2,932
Doba plnění [min]	5

Výstupní obsah vody [-]	0,098
Energetická spotřeba [kJ]	8244,28
Plošná odpařivost [ $\text{kg}_w/\text{h}\cdot\text{m}^2$ ]	0,955
Objemová odpařivost [ $\text{kg}_w/\text{h}\cdot\text{m}^3$ ]	14,689

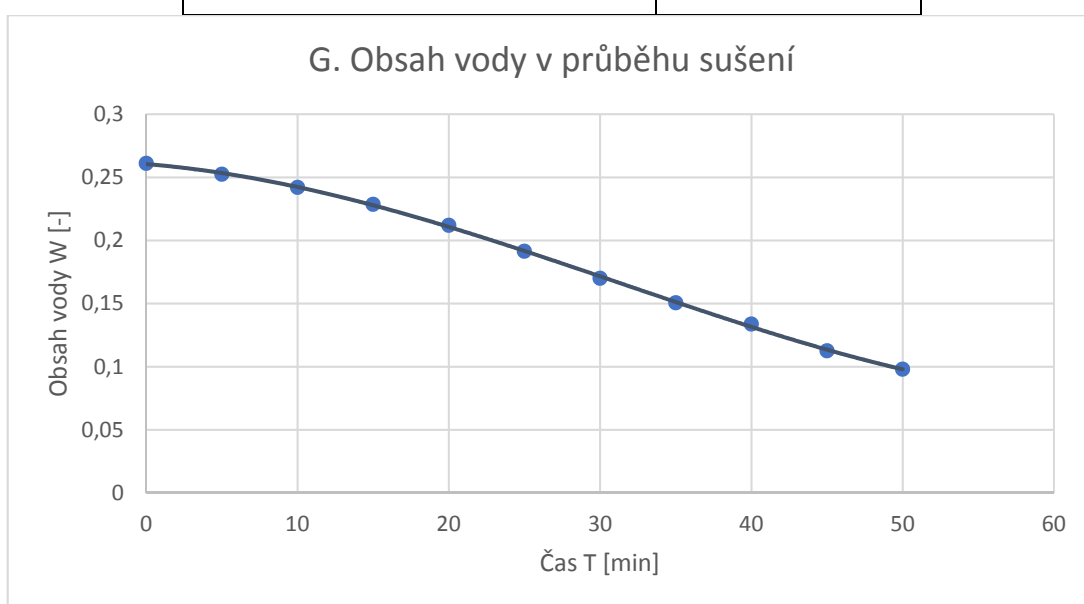


Obrázek 4.3-15 - Sušící křivka měření F

G. Měření – míchaná vrstva, 15% zaplnění, 130 °C, doba sušení T = 35 minut, tlak p = 0,2 bar

Vstupní obsah vody [-]	0,261
Hm. vsázky [kg]	2,974
Doba plnění [min]	4

Výstupní obsah vody [-]	0,078
Energetická spotřeba [kJ]	10217,60
Plošná odpařivost [kg <sub>w</sub> /h.m <sup>2</sup> ]	1,285
Objemová odpařivost [kg <sub>w</sub> /h.m <sup>3</sup> ]	19,774

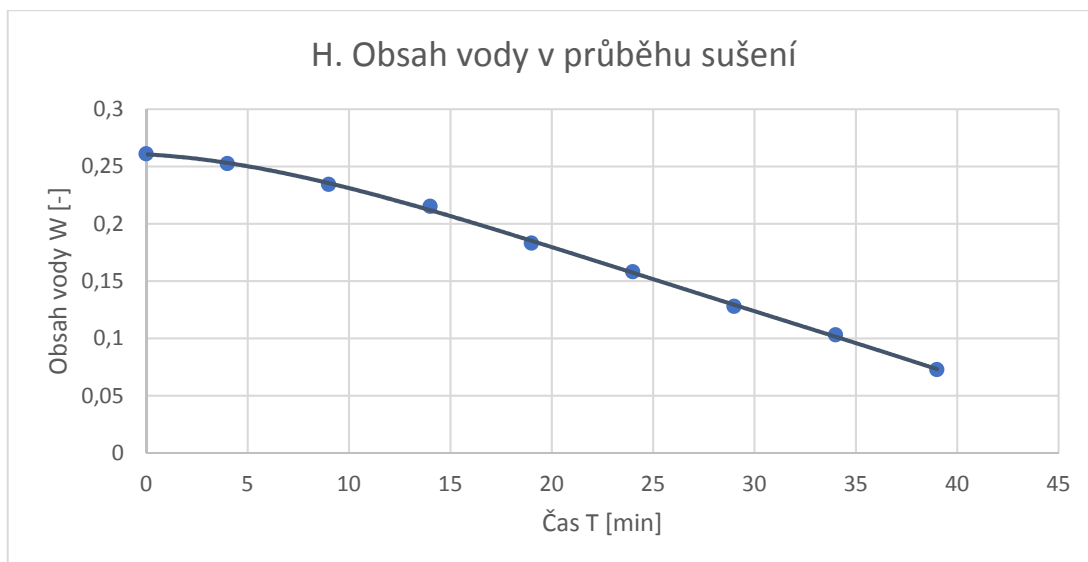


Obrázek 4.3-16 - Sušící křivka měření G

H. Měření – míchaná vrstva, 15% zaplnění, 130 °C, doba sušení T = 45 minut, tlak p = 0,475 bar

Vstupní obsah vody [-]	0,261
Hm. vsázky [kg]	2,938
Doba plnění [min]	3

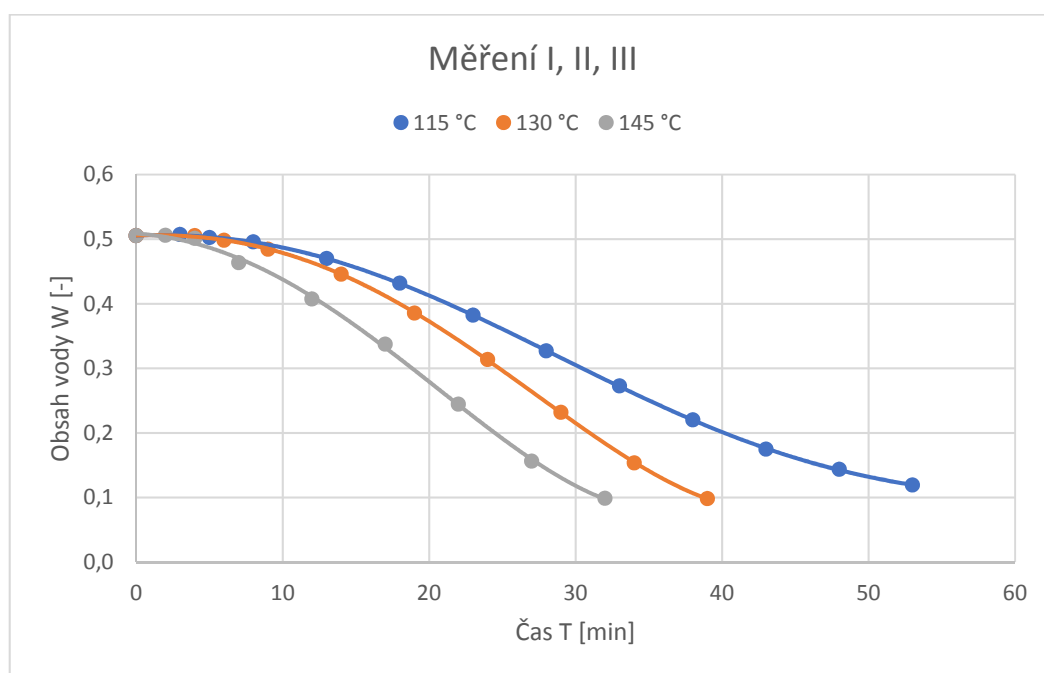
Výstupní obsah vody [-]	0,077
Energetická spotřeba [kJ]	8163,27
Plošná odpařivost [kg <sub>w</sub> /h.m <sup>2</sup> ]	1,028
Objemová odpařivost [kg <sub>w</sub> /h.m <sup>3</sup> ]	15,819



Obrázek 4.3-17 - Sušící křivka měření H

#### 4.4. Grafy pro srovnání proměnlivých parametrů

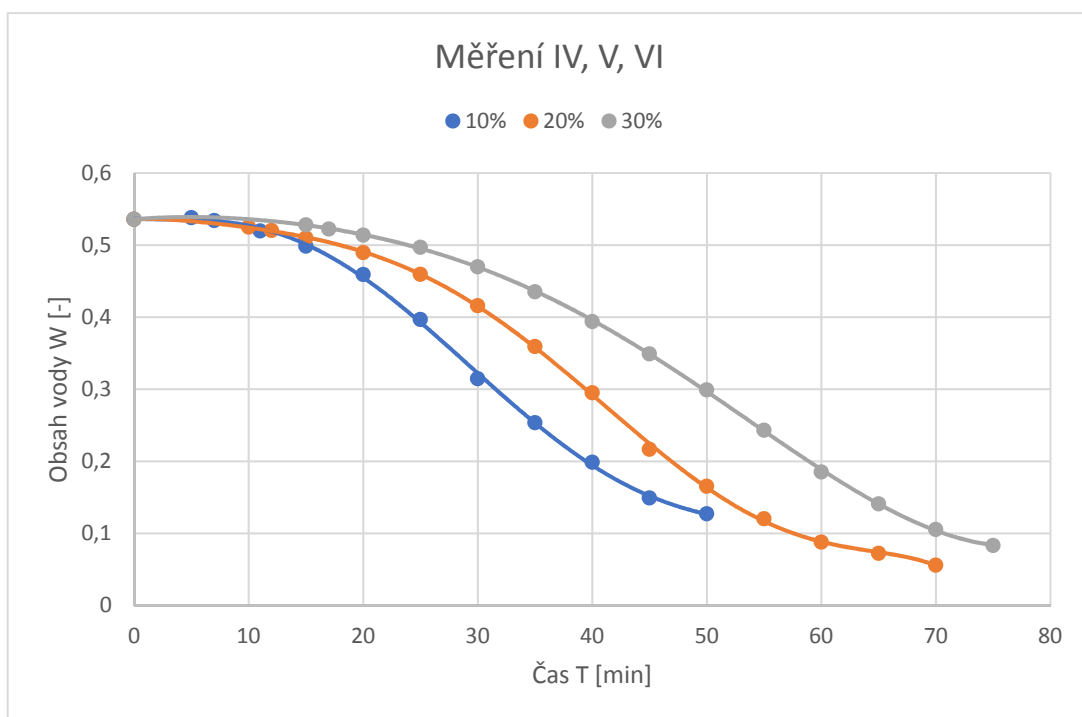
- Srovnání měření I (115 °C), II (130 °C) a III (145 °C)



Obrázek 4.4-1 - Srovnání sušících křivek měření I, II, III

Růst teploty jednoznačně zkracuje dobu sušení materiálu a zvyšuje měrnou odpařivost.

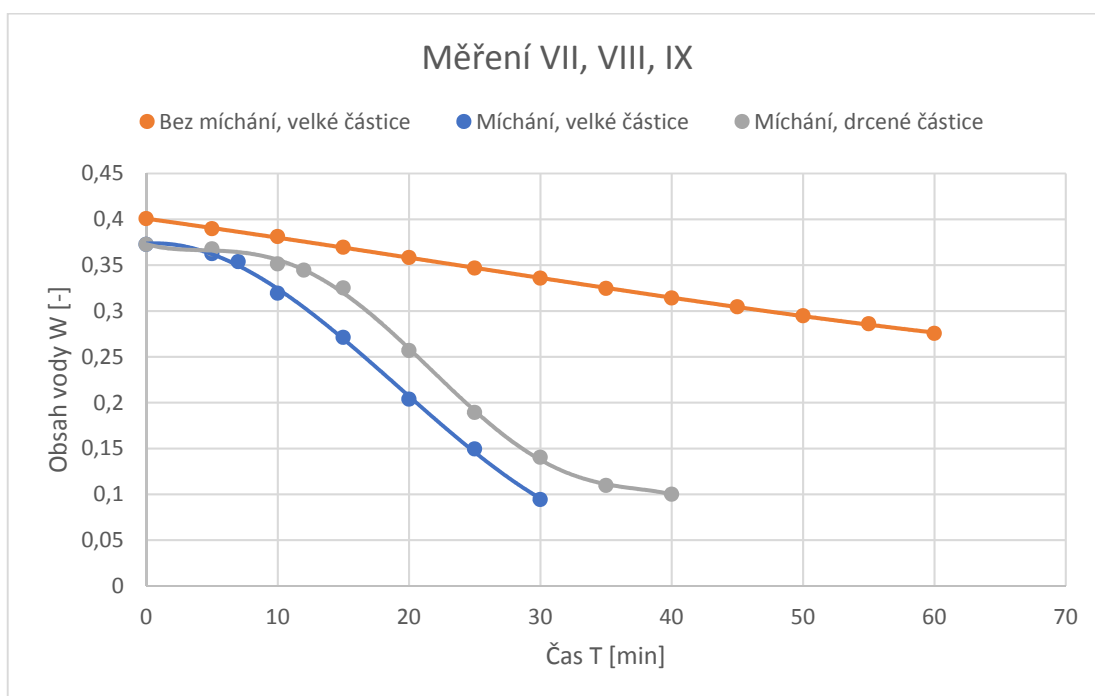
- Srovnání měření IV (10% zaplnění), V (20% zaplnění) a VI (30% zaplnění)



Obrázek 4.4-2 - Srovnání sušících křivek měření IV, V, VI

Růst zaplnění prodlužuje dobu sušení, proti tomu se ale zvyšuje měrná odpařivost.

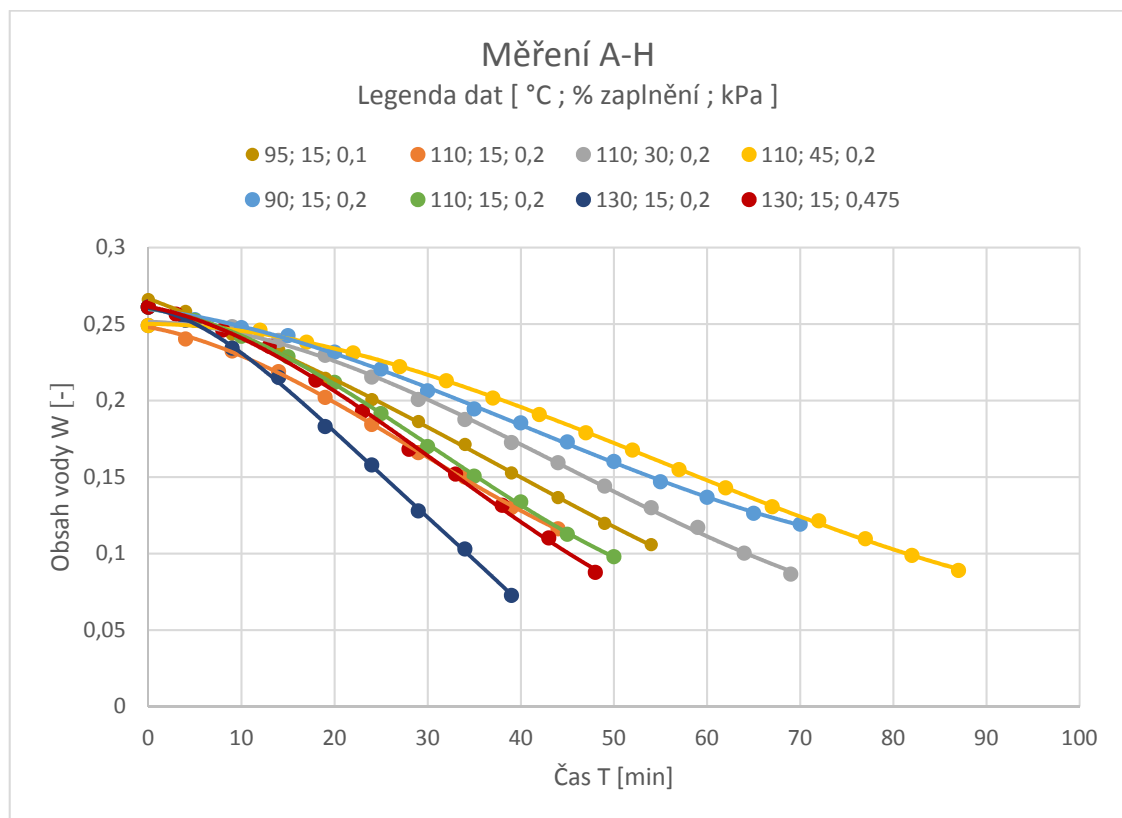
- Srovnání měření VII (nevlhčená, nedrcená kůra, bez míchání), VIII (nevlhčená, nedrcená kůra, míchání) a IX (nevlhčená, drcená kůra, míchání)



Obrázek 4.4-3 - Srovnání sušících křivek měření VII, VIII, IX

Z grafu je patrné, že sušení velkých částic bez míchání je neefektivní a zdlouhavé. Zlepšení vykazuje sušení s přidaným mícháním, které významně napomohlo snížení doby sušení a zlepšení měrné odpařivosti. K dalšímu zlepšení měrné odpařivosti přispělo zmenšení částic dřeva drcením. Z grafu se může zdát třetí varianta (šedá) s drcením pomalejší, ale jedná se zkreslení vlivem delšího plnění sušárny. Křivka pro drcené částice je strmější, přičemž strmost v tomto srovnání znázorňuje měrnou odpařivost.

- Srovnání měření A-H na rybím krmivu



Obrázek 4.4-4 - Srovnání sušících křivek měření A – H

Na grafickém srovnání sušení rybiho krmiva můžeme sledovat vliv jednotlivých parametrů ( °C, % zaplnění, tlak v sušárně). Srovnáním měření s hnědou barvou a měření s barvou světle modrou můžeme vidět, že při nižším tlaku probíhá sušení rychleji. Stejně je tomu při srovnání měření s barvou červenou a tmavě modrou. Měření s barvou oranžovou, šedou a žlutou nám sledují prodloužení doby sušení při zvýšení zaplnění. Měření s barvou světle modrou, zelenou a tmavě modrou sledují zrychlení procesu sušení vlivem rostoucí teploty otopu.



## 4.5. Vyhodnocení experimentů

Z naměřených dat a vypočtených hodnot odpařivosti a energetické spotřeby a grafů je jednoduché popsat vliv změny parametrů.

Nejvyšší odpařivosti dosahují měření s vyšším zaplněním. Z měřených experimentů má nejlepší odpařivost nastavení na 130 °C a 30% zaplnění. S tím ale souvisí prodlužování doby setrvání vsázky v sušárně, aby došlo k požadovanému vysušení.

Opačný vliv na dobu sušení působí zvedání teploty otopu. Se vzrůstem teploty se zkracuje doba sušení stejného množství, tím roste i odpařivost. Negativní dopad má růst teploty na měrnou spotřebu energie potřebné k ohřevu.

Měřeními VII – IX jsme také prokázali jednoznačný vliv velikosti částic a míchání sušené vrstvy na odpařivost a dobu sušení.

Dále můžeme srovnat totožná měření číslo II, IV a IX, kde rozdíl ve zjištěné odpařivosti můžeme připsat nižšímu vstupnímu obsahu vody. Při rostoucím vstupním obsahu vody roste měrná odpařivost a sušení je efektivnější.

Z měření A-H je patrný vliv nejen již zmíněných parametrů, ale také barometrického tlaku, při kterém sušení probíhá. Snížením tohoto tlaku dojde ke snížení teploty varu a tím ke zvýšení rozdílu ( $T_1 - T_2$ ).

## 5. Návrh sušárny na zadané parametry

### 5.1. Zadání návrhu

Navrhnete kontaktní sušárnu pro sušení mokré kůry:

Tabulka 5.1-1 - Zadání návrhu sušárny

Otápění sytou parou	2,7 bar
Sušené množství	100 kg/h
Počáteční obsah vody	50 %
Požadované vysušení na	20 %
Válcová sušárna s poměrem $\frac{D}{L}$	$\frac{1}{4}$

Cílem návrhu je získat rozměr sušárny, potřebný pro splnění provozních požadavků. Dále bude proveden rozbor, jak se bude měnit rozměr sušárny při změně různých provozních parametrů, dle teorie této práce v kapitole 3.

### 5.2. Energetická bilance sušárny

Pro návrh sušárny potřebuji znát potřebný tepelný tok  $Q$ , resp. předané teplo, pro odpaření požadovaného množství vody za 1 hodinu. Při zadaném vstupním obsahu vody 50 % a sušeném množství 100 kg/h a požadované výstupním obsahu vody 20 % vypočtu potřebný odpar vody.

$$m_{w\ vstup} = 0,5 * 100 = 50\ kg_w/h$$

Po snížení obsahu vody v materiálu na 20 % budeme mít hmotnost zbytku

$$m_{20\ \%} = \frac{m_{suš}}{1 - \varphi} = \frac{50}{1 - 0,2} = 62,5\ kg.$$

Tzn., že zůstatek vody je  $m_{w\ výstup} = 62,5 - 50 = 12,5\ kg$  a odpařená voda  $m_{w\ odpar} = 50 - 12,5 = 37,5\ kg$ .

Za 1 hodinu sušení se musí odpařit 37,5 kg vody.

Pro zjednodušení výpočtu a návrhu budu uvažovat dodávání tepla odpovídající pouze vypařování vody. Potřebnou energii na ohřátí vody a materiálu zanedbám. Pro výpočet budu potřebovat znát latentní teplo vody.

Latentní teplo vody 2257 kJ/kg

$$Q_{\text{latentní teplo}} = \dot{m}_w * l_w = 37,5 * 2257 = 84\,637 \text{ kJ}$$

$$Q' = 84\,637 \text{ kJ}$$

Vypočtené teplo  $Q'$  je teoretické potřebné teplo dodané materiálu pro odpaření 37,5 kg vody. V praxi je nutné počítat i se ztrátami tepla, které při sušení vzniknou. Ztráty mohou vzniknout únikem do okolí nedokonalou izolací a zbytkovým teplem v materiálu po vyjmutí ze sušárny. Pro jednodušší výpočet určíme, že ztráty budou tvořit 20 % přivedeného tepla.

$$Q_{\text{přiv}} = \frac{Q'}{0,8} \cong 105\,800 \text{ kJ}$$

Tento potřebný výkon mohu přepočítat na spotřebu páry. Pro tento výpočet budu potřebovat znát entalpii syté páry a vody při zadaném tlaku.

Entalpie syté páry (2,7 bar) 2720 kJ/kg

Entalpie vody (2,7 bar) 546 kJ/kg

Potom spotřebu páry pro sušení vypočtu jako

$$m_{\text{páry}} = \frac{Q_{\text{přiv}}}{\Delta h} = \frac{105800}{2720 - 546} \cong 48,7 \text{ kg}_{\text{páry}}$$

Dále mohu odhadnout přibližnou spotřebu pro ohřev materiálu na vypařovací teplotu, přičemž vstupní teplotu materiálu považuji za teplotu okolí  $T_{ok} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$Q_{\text{ohřev vody}} = c_{p\,w} * \dot{m}_w * (100 - T_{ok}) = 4,18 * 50 * (100 - 15) = 17\,765 \text{ kJ}$$

$$Q_{\text{ohřev kůry}} = c_{p\,kůra} * \dot{m}_{kůry} * (100 - T_{ok}) = 2,51 * 50 * (100 - 15) = 10\,670 \text{ kJ}$$

$$Q_{\text{ohřev}} = 28\,435 \text{ kJ}$$

Pro odhad doby trvání ohřevu využiji spotřebu páry pro sušení jako průtok páry za hodinu (tedy  $\dot{m}'_{\text{páry}} = 48,7 \text{ kg}_{\text{páry}}/\text{h}$ ). Z toho odvozují

$$T'_{\text{ohřev}} = \frac{Q_{\text{ohřev}}}{\dot{m}'_{\text{páry}} * \Delta h} * 60 = \frac{28435}{48,7 * (2720 - 546)} * 60 \cong 16 \text{ min.}$$

Aby došlo k ohřátí a vysušení materiálu za stanovenou dobu  $\pm 60$  minut, odhaduji potřebný průtok páry jako  $\dot{m}_{\text{páry}} = 60 \text{ kg}_{\text{páry}}/\text{h}$ .

Potom čas trvání ohřevu a sušení budou teoreticky

$$T_{suš} = \frac{105800}{60 * (2720 - 546)} * 60 \cong 48 \text{ min},$$

$$T_{ohřev} = \frac{28435}{60 * (2720 - 546)} * 60 \cong 13 \text{ min}.$$

Pro návrh rozměru sušárny budu pro zjednodušení uvažovat pouze teplo potřebné pro sušení. Tomu odpovídá tepelný tok ve Watech, tj. Jouly za sekundu

$$Q = \frac{Q_{přiv}}{3600} = \frac{105800}{3600} \cong 29,4 \text{ kW}.$$

### 5.3. Návrh sušárny dle kapitoly 3 – teorie

Pro teoretický výpočet vycházím z rovnice (3.1-1)  $Q = UA(T_1 - T_2)$ , kde A bude hledaná kontaktní plocha sušené kůry a otápěného tělesa sušárny,  $T_2$  – teplota sytosti za atmosférického tlaku (tj. 100 °C),  $T_1$  – teplota sytosti topné páry při tlaku 2,7 bar (tj. 130 °C), U – součinitel prostupu tepla dle teorie, Q – tepelný tok.

Uvedenou rovnicí si tedy převedu na

$$A = \frac{Q}{U(T_1 - T_2)} \quad 5.1-1$$

Výpočty začnu u součinitele prostupu tepla U. K jeho výpočtu budu potřebovat mimo jiné i tepelnou vodivost lože  $\lambda_{bed}$ , kterou jsem odvozoval již v kapitole (3.3) pomocí zjednodušeného poměrového postupu.

$$U_{\infty} = \frac{h_f}{1 + \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{N_{therm} N_{mix}}} \quad 5.1-2$$

Do této rovnice musím vypočítat uvedené parametry. Pro jejich výpočet budu potřebovat vstupní hodnoty a koeficienty, které jsou uvedeny v tabulce (5.3-1).

Tabulka 5.3-1 - Konstanty a volené proměnné pro teoretický výpočet prostupu tepla

Faktor pokrytí povrchu	$\phi_A = 0,9$
Tepelná vodivost vzduchu	$\lambda_G = 0,0314 \text{ W/m}^2\text{K}$
Charakteristický rozměr částice dřeva (kůry)	$d = 0,005 \text{ m}$
Accommodation koeficient	$\gamma = 0,8$
Univerzální plynová konstanta	$R = 8,314 \text{ J/K.mol}$
Teplota vypařování	$T = 373,15 \text{ K}$
Molární hmotnost	$M = 29 \text{ g/mol}$
Dynamická viskozita vzduchu	$\mu = 2,17 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s}$
Atmosférický tlak	$p = 101 \text{ kPa}$

Nyní vypočítám  $h_f$  dle rovnice (3.1-10) a odpovídajících rovnic (3.1-11) až (3.1-13).

$$\Lambda = \frac{16}{5} \sqrt{\frac{RT}{2\pi M p} \mu} = \frac{16}{5} * \sqrt{\frac{8,314 * 373,15}{2\pi * 29} * \frac{2,17 * 10^{-5}}{101000}} = 2,83691 * 10^{-9}$$

$$l = 2\Lambda \frac{2-\gamma}{\gamma} = 2 * 2,83691 * 10^{-9} * \frac{2-0,8}{0,8} = 8,51074 * 10^{-9}$$

$$\begin{aligned} h_{f_p} &= \frac{4\lambda_G}{d} \left[ \left( 1 + \frac{2l+2\delta}{d} \right) \ln \left( 1 + \frac{d}{2l+2\delta} \right) - 1 \right] \\ &= \frac{4 * 0,0314}{0,02} \\ &\quad * \left[ \left( 1 + \frac{2 * 8,51074 * 10^{-9} + 0}{0,005} \right) * \ln \left( 1 + \frac{0,005}{2 * 8,51074 * 10^{-9} + 0} \right) - 1 \right] \\ &= 291,154 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_f &= \phi_A h_{f_p} + (1 - \phi_A) \frac{2\lambda_G/d}{\sqrt{2} + (2l+2\delta)/d} + h_{rad} \\ &= 0,9 * 291,154 + (1 - 0,9) * \frac{2 * \frac{0,0314}{0,005}}{\sqrt{2} + \frac{(2 * 8,51074 * 10^{-9} + 0)}{0,005}} + 0 \cong 263 \text{ W/m}^2\text{K} \end{aligned}$$

Dále potřebuji vypočítat  $N_{therm}$  a  $N_{mix}$  podle rovnic (3.1-7) a (3.1-8). Pro jejich výpočet zavádím několik dalších součinitelů, konstant a odvozených středních materiálových hodnot souvisejících s mícháním, které jsou uvedeny v tabulce (5.3-2).

Tabulka 5.3-2 - Související návrhové proměnné pro výpočet prostupu tepla

Otáčky míchadla	$n = 17 \text{ min}^{-1} = 0,28333 \text{ s}^{-1}$
Míchací číslo	$t_{\text{mix}} = 1/n = 3,52941 \text{ s}$
Měrná hmotnost lože	$\rho_{\text{bed stř.}} = 674,625 \text{ kg/m}^3$
Tepelná kapacita lože	$c_{\text{p stř.}} = 3088 \text{ J/kg.K}$
Tepelná vodivost lože	$\lambda_{\text{bed stř.}} = 0,40 \text{ W/mK}$
Průměr sušárny pro návrh míchání – orientační	$D = 1 \text{ m}$
Korelační součinitel C	$C = 9$
Korelační součinitel x	$x = 0,05$

$$N_{\text{therm}} = (h_f^2 t_{\text{mix}} / (\rho c \lambda)_{\text{bed stř.}}) = \left( \frac{263^2 * 3,52941}{674,625 * 3088 * 0,40} \right) = 0,26318$$

$$Fr = ((2\pi n)^2 D / 2g) = \frac{(2\pi * 0,28333)^2 * 1}{2 * 9,81} = 0,16153$$

$$N_{\text{mix}} = C Fr^x = 9 * 0,16153^{0,05} = 8,2159$$

Pak

$$U_{\text{teor}} = \frac{h_f}{1 + \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{N_{\text{therm}} N_{\text{mix}}}} = \frac{263}{1 + \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{0,26318 * 8,2159}} \cong 111 \text{ W/m}^2\text{K},$$

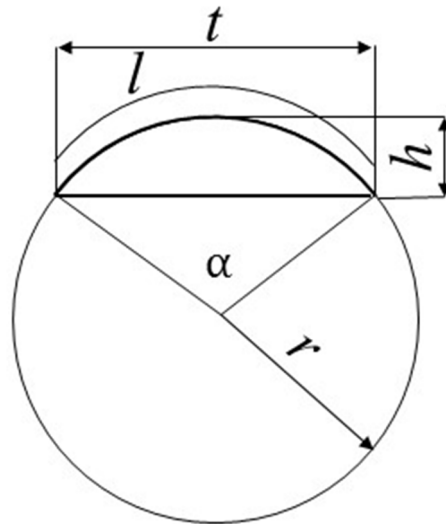
jako střední hodnota proměnné hodnoty U při snižování obsahu vody z 50 % na 20 %.

Pak potřebná plocha pro odpaření 37,5 kg vody za hodinu je

$$A_{\text{teor}} = \frac{Q}{U_{\text{teor}} (T_1 - T_2)} = \frac{29,4}{111 * (130 - 100)} \cong 8,84 \text{ m}^2$$

Navrhuji válcovou sušárnu s poměrem průměr/délka  $\frac{D}{L} = \frac{1}{4}$ . Vypočtená plocha A je dána délkou sušárny a délkou oblouku kruhové úseče.

Metodou pokus omyl jsem pomocí výpočetních vzorců na [dopočítej.cz](http://dopočítej.cz) [18] ověřil na kruzích několika poloměrů, že 10% zaplnění je dosaženo s úhlem svírajícím úseč  $\alpha \approx 93,2^\circ$  a poměrem délky oblouku úseče a průměrem kružnice  $\frac{l}{D} \approx 0,813$ . Dosazením poměru průměr/délka do vztahu pro délku oblouku úseče získám návrh rozměrů sušárny.



Obrázek 5.3-1 - Kruhová úseč

$$l = 0,813 * D = 0,813 * \frac{L}{4}$$

$$A = l * L = 0,813 * \frac{L^2}{4} \Rightarrow L = \sqrt{\frac{4 * A}{0,813}} = \sqrt{\frac{4 * 11}{0,813}} \cong 6,6 \text{ m}$$

$$D = \frac{L}{4} = \frac{7,36}{4} = 1,65 \text{ m}$$

$$S_{teor} = \pi D * L = \pi * 1,65 * 6,6 \cong 34,2 \text{ m}^2$$

Podle teorie jsem navrhl sušárnu o velikosti  $D = 1,65 \text{ m}$  a  $L = 6,6 \text{ m}$ , ve které by došlo k požadovanému vysušení dřevní kůry z 50 % obsahu vody na 20 % za 60 minut se spotřebou přibližně 60 kg páry za hodinu.

Pokud ale pro takto navrženou sušárnu vypočítám zaplněný objem 10 %, zjistím, že se jedná o

$$V_{10\%} = \frac{\pi * D^2}{4} * 0,1 * L = \frac{\pi * 1,65^2}{4} * 0,1 * 6,6 \cong 1,41 \text{ m}^3.$$

Pokud na tento objem aplikuji odvozené parametry vstupní biomasy, zjistím, že by se jednalo o množství

$$m = \rho_{bio\ 50\%} * V_{10\%} * 0,6 = 750 * 1,41 * 0,6 \cong 635 \text{ kg}$$

To je 6,35x více, než pro kolik jsem návrh prováděl a konstatuji, že se jedná o nevhodný postup návrhu.

Úvahou z opačného směru, tedy od požadavku vsázky 100 kg, která při své teoretické vstupní měrné hmotnosti  $750 \text{ kg/m}^3$  bude zaobírat objem  $0,1333 \text{ m}^3$  a při započtení mezerovitosti bude 10% zaplnění mít objem  $0,2222 \text{ m}^3$ , získám z uvedených vztahů mezi rozměry průměru bubnu  $D = 0,89 \text{ m}$  a délkou  $L = 3,56 \text{ m}$  s kontaktní plochou  $A = 2,52 \text{ m}^2$ . Z toho pak vyplývá pro zachování předaného tepla nový součinitel prostupu tepla  $U = 507 \text{ W/m}^2\text{K}$ , což je přibližně 4,57x více než jsem vypočetl během tohoto návrhu.

Teoretický výpočet je proveden s mnoha zjednodušeními, o kterých lze konstatovat, že negativně ovlivňují výsledný součinitel prostupu tepla  $U$  a reálně by se dalo dosáhnout vyšších hodnot, než jsem zde vypočítal, a tím zmenšit potřebnou plochu sušárny.

## 5.4. Návrh sušárny dle kapitoly 4 – experimentální

### 5.4.1. Návrh

Pro tento způsob návrhu využiji experimentálně zjištěné závislosti a průběhy sušení. Předpokládá se přenositelnost sušících křivek.

Pro první návrh sušárny využiji jednoho z měření, které probíhalo při stejné teplotě otopu (tj.  $130 \text{ }^\circ\text{C}$ ) a zvolím zaplnění 10 %. Tomu odpovídá měření číslo II a IV. Z těchto měření vezmu průměrnou plošnou odpařivost, která byla vztažena k úseku od naplnění sušárny do snížení obsahu vody na 20 %, na otápěnou plochu sušárny  $1 \text{ m}^2$  a interval sušení 60 minut. Hodnocený úsek je současně úsekem nejlepšího odpařovacího výkonu.

$$\text{Střední plošná odpařivost z měření II a IV} \quad \dot{m}_{SII} = 2 \text{ kg}_w/h \cdot \text{m}^2$$

$$\text{Požadované odpařené množství} \quad m_{w \text{ odpar}} = 37,5 \text{ kg}$$

Na základě teorie a zjištěné měrné odpařivosti vypočítám součinitel prostupu tepla  $U$  pro srovnání s teorií.

$$E_{\dot{m}_S} = \dot{m}_{SII} * l_w = 2 * 2257 = 4514 \text{ kJ/h} \cdot \text{m}^2$$

$$Q_{\dot{m}_{SII}} = \frac{E_{\dot{m}_S}}{3,6} = \frac{4514}{3,6} \cong 1254 \text{ W}$$

Plocha sušárny  $S$  a rozdíl teplot povrchu  $\Delta T$  dány z experimentu.

$$U_{exp} = \frac{Q_{\dot{m}_{SII}}}{S * \Delta T} = \frac{1254}{0,211 * 30} \cong 198 \text{ W/m}^2\text{K}$$



Tuto hodnotu mohu dále použít stejně jako v návrhu dle teorie.

$$A_{exp} = \frac{Q}{U(T_1 - T_2)} = \frac{29400}{198 * (130 - 100)} \cong 4,95 \text{ m}^2$$

$$l = 0,813 * D = 0,813 * \frac{L}{4}$$

$$A = l * L = 0,813 * \frac{L^2}{4} \Rightarrow L = \sqrt{\frac{4 * A}{0,813}} = \sqrt{\frac{4 * 4,95}{0,813}} \cong 4,94 \text{ m}$$

$$D = \frac{L}{4} = \frac{4,94}{4} \cong 1,23 \text{ m}$$

Takto navržená sušárna bude mít celý otápeňý povrch

$$S_{exp} = \pi D * L = \pi * 1,23 * 4,94 \cong 19,1 \text{ m}^2$$

A pro kontrolu vypočítám odpařivost sušárny

$$\dot{m}_S \text{ kontrola} = \frac{m_W \text{ odpar}}{S_{exp}} = \frac{37,5}{19,1} \cong 1,96 \text{ kg}_W/h. \text{ m}^2$$

Zjednodušit si postup návrhu dle experimentů můžu navržením plochy sušárny přímo ze získané odpařivosti jednotlivých experimentů a z této plochy následně odvodit rozměry sušárny.

$$S_{exp1} = \frac{m_W \text{ odpar}}{\dot{m}_S} = \frac{37,5}{2} = 18,75 \text{ m}^2$$

Plocha pláště válce je dána vztahy  $S = \pi * D * L = \pi * D * 4D$

$$D = \sqrt{\frac{S}{4\pi}} \cong 1,22 \text{ m}$$

$$L = 4D = 4 * 1,221 \cong 4,89 \text{ m}$$

### 5.4.2. Změna parametrů

Změním-li jeden ze zkoušených parametrů při experimentech, projeví se mi změna plošné odpařivosti. Protože jsem provedl u všech experimentů přepočítání odpařivosti na univerzální jednotku [ $\text{kg}/\text{h}\cdot\text{m}^2$ ], stačí mi vždy jen dopočítat výše uvedené vzorce vždy pro jinou odpařivost, čímž získám nové rozměry vyhovující danému vysušení.

Při zachování rozměru sušárny, tedy kdyby došlo ke změně zaplnění nebo teploty, dle prvního návrhu, dojde ke změně doby sušení. Tuto změnu doby sušení vyjádřím zjednodušeně jako poměr měrných odpařivostí a převedu na minuty.

#### Změna teploty otápění

Z naměřených údajů pro změnu teploty otápěného povrchu sušárny vychází, že se snížením teploty povrchu roste potřebná velikost sušárny a doba sušení. Se zvýšením teploty povrchu se snižuje potřebná plocha sušárny a zkracuje se doba sušení.

- Otop 115 °C – dle měření I

Plošná odpařivost měření I	$\dot{m}_s = 1,591 \text{ kg}_w/\text{h}\cdot\text{m}^2$
Změna rozměru sušárny	
Otápěná plocha	$S_{\text{exp } 2} \cong 23,6 \text{ m}^2$
Průměr sušárny	$D \cong 1,37 \text{ m}$
Délka sušárny	$L \cong 5,48 \text{ m}$
Změna doby sušení	
Nová doba sušení	$t_{\text{exp } 2} \cong 75 \text{ min}$

- Otop 145 °C – dle měření III

Plošná odpařivost měření III	$\dot{m}_s = 2,519 \text{ kg}_w/\text{h}\cdot\text{m}^2$
Změna rozměru sušárny	
Otápěná plocha	$S_{\text{exp } 3} \cong 14,89 \text{ m}^2$
Průměr sušárny	$D \cong 1,09 \text{ m}$
Délka sušárny	$L \cong 4,35 \text{ m}$
Změna doby sušení	
Nová doba sušení	$t_{\text{exp } 3} \cong 48 \text{ min}$

### Změna zaplnění

Z naměřených údajů pro změnu zaplnění sušárny vychází, že se zvýšením zaplnění roste měrná odpařivost a tím se snižuje potřebná plocha sušárny pro návrhové sušení nebo doba sušení.

- Zaplnění 20 % - dle měření V

Plošná odpařivost měření V	$\dot{m}_S = 3,08 \text{ kg}_w/h. \text{ m}^2$
Změna rozměru sušárny	
Otápěná plocha	$S_{\text{exp } 4} \cong 12,18 \text{ m}^2$
Průměr sušárny	$D \cong 0,98 \text{ m}$
Délka sušárny	$L \cong 3,94 \text{ m}$
Změna doby sušení	
Nová doba sušení	$t_{\text{exp } 4} \cong 39 \text{ min}$

- Zaplnění 30 % - dle měření VI

Plošná odpařivost měření VI	$\dot{m}_S = 3,77 \text{ kg}_w/h. \text{ m}^2$
Změna rozměru sušárny	
Otápěná plocha	$S_{\text{exp } 5} \cong 9,95 \text{ m}^2$
Průměr sušárny	$D \cong 0,89 \text{ m}$
Délka sušárny	$L \cong 3,56 \text{ m}$
Změna doby sušení	
Nová doba sušení	$t_{\text{exp } 5} \cong 32 \text{ min}$

### 5.4.3. Hodnocení návrhu sušárny

V této kapitole jsem provedl návrh rozměrů sušárny nejdříve dle odvozené teorie z kapitoly (3), kde jsem získal rozměry sušárny  $D = 1,65 \text{ m}$ ,  $L = 6,6 \text{ m}$  s kontaktní plochou  $A = 8,84 \text{ m}^2$  odpovídající dle teorie odvozenému součiniteli prostupu tepla  $U_{\text{teor}} = 111 \text{ W/m}^2\text{K}$ , a následně návrh dle experimentálně zjištěných dat odpařivosti. Pro experimentální návrh jsem nejdříve dle teorie určil součinitel prostupu tepla  $U_{\text{exp}} = 198 \text{ W/m}^2\text{K}$  a následně s jeho pomocí vypočítal rozměry sušárny  $D = 1,23 \text{ m}$ ,  $L = 4,94 \text{ m}$  s kontaktní plochou  $A = 4,95 \text{ m}^2$ .

Tabulka 5.4.3-1 - Srovnání rozměrů navržené sušárny dle teorie a dle experimentálně zjištěné odpařivosti

	Sušárna teoreticky	Sušárna teor./odpařivost	Sušárna dle experimentů
Součinitel U	111 W/m <sup>2</sup> K	198 W/m <sup>2</sup> K	---
Průměr D	1,65	1,23	1,22
Délka L	6,6	4,94	4,89

Srovnám-li součinitele prostupu tepla U pro teorii a pro experiment, je patrné, že se značně liší. Teoretická hodnota je výrazně nižší (cca 56 %) než hodnota zjištěná experimentálně. Jak bylo řečeno již u teoretického návrhu v kapitole (5.2), hodnotu U snižují zjednodušení a zanedbání mnoha komplikovaných faktorů pro tyto výpočty, stejně tak volené konstanty dle teorie. V praxi na experimentální sušárně může také určitou roli hrát ohřátá plocha kovového míchadla, které vnáší určité teplo chaoticky do vrstvy materiálu při míchání.

V kapitole (5.3.2) jsem na návrhu velikosti sušárny znázornil vliv změny parametrů sušárny. Změny, ke kterým dojde oproti prvnímu návrhu na 130 °C, 10% zaplnění popisují v následující tabulce.

Tabulka 5.4.3-2 - Srovnání vlivu změny teploty otopu či zaplnění na rozměry sušárny a dobu sušení

	Výchozí návrh	Změna teploty		Změna zaplnění	
		130 °C 10% zaplnění	115 °C	145 °C	20% zaplnění
Vliv na velikost a dobu sušení	---	↑	↓	↓	↓
Plocha sušky	18,75 m <sup>2</sup> ---	23,6 m <sup>2</sup> 125,7 % S <sub>exp 1</sub>	14,89 m <sup>2</sup> 79,4 % S <sub>exp 1</sub>	12,18 m <sup>2</sup> 65 % S <sub>exp 1</sub>	9,95 m <sup>2</sup> 53 % S <sub>exp 1</sub>
Doba sušení při zachování rozměrů	60 min	75 min	48 min	39 min	32 min

I z tohoto srovnání je patrné, že nejvíce procesu sušení přispívá zvýšení zaplnění sušárny.

## 6. Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout sušárnu pro zadané požadavky sušeného množství a vstupního a výstupního obsahu vody v dřevní štěpce. Pro zpracování tohoto návrhu jsem nejdříve vypracoval rešerši na téma: co je biomasa, způsoby sušení a druhy sušáren a vhodné typy sušáren pro biomasu. Jedná se o kapitoly (1) a (2). V této části popisují mimo jiné zásadní vliv obsahu vody v biomase na její energetický potenciál. Biomasa s obsahem vody nad 55 % je již prakticky nespalitelná a tato hodnota je také považována za hranici spalitelnosti. Snižováním obsahu vody v biomase sušením nese mnoho pozitivních vlivů. Roste výhřevnost, klesá objem spalin.

Dalším bodem této práce bylo popsat vedení tepla v míchané vrstvě v kontaktní sušárně s otápným pláštěm. Na základě tohoto popisu jsem následně vyhodnotil vliv jednotlivých parametrů sušárny. Z parametrů majících vliv na součinitel prostupu tepla  $U$  jsou nejvýznamnějšími: teplotní spád mezi otápnou stěnou a teplotou odparu vody, velikost kontaktní plochy mezi materiálem a otápnou stěnou, výška vrstvy sušeného materiálu, velikost částic ve vrstvě sušeného materiálu, promíchávání vrstvy sušeného materiálu. Tato část je rozebrána v kapitole (3). Na konci kapitoly se nachází teoretický grafický přehled vlivu jednotlivých parametrů na součinitel  $U$  a na celkový tepelný tok. Do grafické podoby jsem pomocí teoretického rozboru o prostupu tepla zpracoval: závislost součinitele  $U$  na obsahu vody v materiálu v průběhu sušení; závislost na velikosti částic sušeného materiálu; závislost na teplotě otápného povrchu; závislost na zaplnění. Nejvýznamnější závislost vyšla dle velikosti částic materiálu, zde se může součinitel  $U$  změnit až o jeden řád. Graf znázorňující změnu prostupu a sdílení tepla v závislosti na obsahu vody dává představu o zpomalování sušícího procesu se úbytkem vody, a že lepšího sušícího efektu dosahujeme u materiálu mokřejších.

Dále je součástí práce zpracování dat, v kapitole (4), naměřených během experimentů, které probíhaly v laboratoři Ústavu energetiky Fakulty strojní ČVUT. Během těchto experimentů byly získány grafické sušící křivky a měrná odpařivost sušárny pro různé nastavení provozních parametrů. Experimenty se ověřil význam různých parametrů. Díky experimentům jsme zjistili, že se efektivita sušení, reprezentovaná měrnou odpařivostí, zvyšuje: s rostoucím  $\Delta T$ ; s rostoucím zaplněním; se zmenšováním sušených částic. Součástí této kapitoly jsou také grafy srovnávající několik křivek mezi sebou, aby bylo názorněji vidět vliv změny některého parametru sušárny.

Dle vypracované teorie a naměřených experimentálních dat byl proveden návrh sušárny v kapitole (5) dle zadaných požadavků. Zadáno bylo sušení 100 kg dřevní kůry za hodinu s vysušením z 50 % vlhkosti na 20 % a otápění sytou párou o tlaku 2,7 bar. Tento návrh jsem provedl jednou dle teorie odvození v kapitole (3) a jednou dle experimentálních zjištění z kapitoly (4). Otápěná plocha sušárny dle teorie vyšla  $S_{\text{teor}} = 34,2 \text{ m}^2$ , což je 1,79x větší než plocha vypočtená z experimentů  $S_{\text{exp}} = 19,1 \text{ m}^2$ . Rozdíl je dán součinitelem prostupu tepla  $U$ , který je pro teorii jen 56 % experimentálně zjištěného. Nižší hodnota teoretického  $U$  je dána zjednodušeními ve výpočtu, zanedbanými vlivy atd., které jeho hodnotu snižují. V této kapitole jsem také provedl dle experimentů rozbor změny nastavení sušárny a dopad na navrhovanou velikost sušárny nebo změnu doby sušení pro sušárnu z prvního návrhu. Změnou teploty otopu z původních 130 °C na 115 °C bychom zpomalili sušení na 75 minut nebo by se nám zvětšila sušárna na 23,6 m<sup>2</sup>, změnou na 145 °C bychom zkrátili sušení na 48 minut nebo by se nám sušárna zmenšila na 14,89 m<sup>2</sup>. Změnou zaplnění na 20 % či 30 % bychom zkrátili dobu sušení na 39 minut, resp. 32 minut nebo by se nám zmenšila sušárna na 12,18 m<sup>2</sup>, resp. 9,95 m<sup>2</sup>.

## Bibliografie

- [1] **J. Budín**, „Německý průmysl: Odklon Německa od uhlí neproběhne před rokem 2030,“ 11 11 2018. [Online]. Available: <http://oenergetice.cz/nemecko/nemecky-prumysl-odklon-nemecka-od-uhli-neprobehne-pred-rokem-2030/>. [Přístup získán 30. 12. 2018].
- [2] **P. Noskiewič**, *Biomasa a její energetické využití*, sv. 23, Ostrava: VŠB-TUO, 1996.
- [3] **D. Vobořil**, „Biomasa - využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR,“ 6 2 2017. [Online]. Available: <http://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/biomasa-vyuziti-zpracovani-vyhody-a-nevyhody/>. [Přístup získán 30. 12. 2018].
- [4] **J. Havlík a T. Dlouhý**, „Sušení biomasy pro energetické využití,“ v *Energie z biomasy XIV.*, Brno, 2013.
- [5] **K. Murtinger a J. Beranovský**, *Energie z biomasy*, Brno: ERA, 2006.
- [6] **VÚKOZ**, „Seznam rostlin vhodných k pěstování za účelem využití biomasy pro energetické účely z pohledu minimalizace rizik pro ochranu přírody a krajiny,“ 2016. [Online]. Available: [http://www.vukoz.cz/dokumenty/057/seznamy/Seznam\\_2015.pdf](http://www.vukoz.cz/dokumenty/057/seznamy/Seznam_2015.pdf). [Přístup získán 30. 12. 2018].
- [7] **J. Gruber**, „Sušení biomasy,“ VUT Brno, Brno, 2014.
- [8] **M. Baláš a J. Moskalík**, „Měření vlhkosti paliv,“ v *Energie z biomasy X.*, Brno, 2009.
- [9] **T. Dlouhý**, „Spalování a kotle,“ 17 2 2018. [Online]. Available: <http://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/2018/02/SK-pr1.pdf>. [Přístup získán 31. 12. 2018].
- [10] **J. Zvoníček**, *Sušárny*, Praha: ČVUT Praha, 1966.
- [11] **M. Zárybnická**, „Sušení Biomasy,“ v *Energie z biomasy XII.*, Brno, 2011.
- [12] **J. Šesták a R. Žitný**, *Tepelné pochody II - Výměníky tepla, odpařování, sušení, průmyslové pece a elektrický ohřev*, Praha: ČVUT Praha, 1997.

- [13] **T. Utěšil**, „Suška na biomasu,“ v *Energie z biomasy X.*, Brno, 2009.
- [14] **O. Söhnel a M. Richter**, „Průmyslové technologie III Stroje a zařízení chemického průmyslu,“ Univerzita J. E. Purkyně v Ústí n. Labem, Fakulta životního prostředí, Ústí nad Labem, 2013.
- [15] **D. Šnita a kolektiv**, Chemické inženýrství I, Praha: VŠCHT v Praze, 2005.
- [16] **J. Havlík a T. Dlouhý**, „Snižování energetické náročnosti sušení biomasy,“ v *Energie z biomasy XVIII.*, Brno, 2017.
- [17] **A. Mujumdar**, Handbook of Industrial Drying, Boca Raton: CRC Press, 2006.
- [18] **Dopocítej.cz**, „Kruhová úseč,“ [Online]. Available: [http://www.dopocitej.cz/kruhova\\_usec.html](http://www.dopocitej.cz/kruhova_usec.html). [Přístup získán 14. 12. 2019].
- [19] **J. Šesták a F. Rieger**, Přenos hybnosti, tepla a hmoty, Praha: ČVUT Praha, 2004.
- [20] **C. J. Roos**, Biomass Drying and Dewatering for Clean Heat & Power, WA: North West CHP application center, 2008.
- [21] **J. Havlík a T. Dlouhý**, „Provozní charakteristika kontaktní parní sušky na biomasu,“ v *Energie z biomasy XVII.*, Brno, 2016.



## Seznam obrázků

OBRÁZEK 2.1-1 - ZÁVISLOST VÝHŘEVNOSTI BIOMASY NA OBSAHU VODY [4] .....	20
OBRÁZEK 2.3.1-1 - KOMOROVÁ SUŠÁRNA [14] .....	24
OBRÁZEK 2.3.1-2 - PÁSOVÁ SUŠÁRNA [14] .....	24
OBRÁZEK 2.3.1-3 - BUBNOVÁ SUŠÁRNA [15] .....	25
OBRÁZEK 2.3.1-4 - SESYPNÁ SUŠÁRNA [12] .....	25
OBRÁZEK 2.3.1-5 - FLUIDNÍ SUŠÁRNA S ÚLETEM [12] .....	26
OBRÁZEK 2.3.1-6 - FLUIDNÍ SUŠÁRNA S NAKLONĚNÝM LOŽEM [15] .....	26
OBRÁZEK 2.3.1-7 - PROUDOVÁ SUŠÁRNA [15] .....	26
OBRÁZEK 2.3.2-1 - VÁLCOVÁ SUŠÁRNA PRO SUŠENÍ PAPIRU [10] .....	27
OBRÁZEK 2.3.2-2 - VÁLCOVÁ SUŠÁRNA [12] .....	27
OBRÁZEK 2.3.2-3 - BUBNOVÁ SUŠÁRNA KONDUKTIVNÍ [12] .....	28
OBRÁZEK 2.3.2-4 - LOPATKOVÁ SUŠÁRNA [15] .....	29
OBRÁZEK 3.3-1 - ZÁVISLOST TEPELNÉ VODIVOSTI NA OBSAHU VODY .....	42
OBRÁZEK 3.3-2 - ZÁVISLOST SOUČINITELE U NA OBSAHU VODY .....	43
OBRÁZEK 3.3-3 - ZÁVISLOST TEPELNÉHO TOKU Q NA OBSAHU VODY .....	43
OBRÁZEK 3.3-4 - ZÁVISLOST SOUČINITELE U NA VELIKOSTI ČÁSTIC BIOMASY .....	44
OBRÁZEK 3.3-5 - ZÁVISLOST TEPELNÉHO TOKU Q NA TEPLITĚ OTOPU .....	45
OBRÁZEK 3.3-6 - ZÁVISLOST TEPELNÉHO TOKU Q NA ZAPLNĚNÍ .....	46
OBRÁZEK 4.1-1 - KONTAKTNÍ SUŠÁRNA ČVUT FS .....	47
OBRÁZEK 4.1-2 - MĚŘÍCÍ STANICE S DISPLEJEM TENZOMETRICKÉ VÁHY .....	48
OBRÁZEK 4.1-3 - POHLED DO SUŠÁRNY S MÍCHADLEM .....	49
OBRÁZEK 4.1-4 - NABÍRÁNÍ MULČOVACÍ KŮRY .....	49
OBRÁZEK 4.1-5 - MULČOVACÍ KŮRA .....	49
OBRÁZEK 4.1-6 - NÁDOBA PRO ODMĚŘOVÁNÍ POŽADOVANÉHO MNOŽSTVÍ PRO PLNĚNÍ .....	50
OBRÁZEK 4.1-7 - ELEKTROMĚR PRO ELEKTRICKÝ OHŘEV SUŠÁRNY .....	50
OBRÁZEK 4.1-8 - VZORKY PRO LABORATORNÍ ZJIŠTĚNÍ OBSAHU VODY .....	51
OBRÁZEK 4.1-9 - LABORATORNÍ PEC S UMÍSTĚNÝMI VZORKY .....	52
OBRÁZEK 4.1-10 - SROVNÁNÍ SUCHÉ A VLHKÉ MULČOVACÍ KŮRY NEDRCENÉ .....	52
OBRÁZEK 4.3-1 - SUŠÍCÍ KŘIVKA MĚŘENÍ I .....	56
OBRÁZEK 4.3-2 - SUŠÍCÍ KŘIVKA MĚŘENÍ II .....	57
OBRÁZEK 4.3-3 - SUŠÍCÍ KŘIVKA MĚŘENÍ III .....	58
OBRÁZEK 4.3-4 - SUŠÍCÍ KŘIVKA MĚŘENÍ IV .....	59
OBRÁZEK 4.3-5 - SUŠÍCÍ KŘIVKA MĚŘENÍ V .....	60
OBRÁZEK 4.3-6 - SUŠÍCÍ KŘIVKA MĚŘENÍ VI .....	61
OBRÁZEK 4.3-7 - SUŠÍCÍ KŘIVKA MĚŘENÍ VII .....	62
OBRÁZEK 4.3-8 - SUŠÍCÍ KŘIVKA MĚŘENÍ VIII .....	63
OBRÁZEK 4.3-9 - SUŠÍCÍ KŘIVKA MĚŘENÍ IX .....	64
OBRÁZEK 4.3-10 - SUŠÍCÍ KŘIVKA MĚŘENÍ A .....	65
OBRÁZEK 4.3-11 - SUŠÍCÍ KŘIVKA MĚŘENÍ B .....	66
OBRÁZEK 4.3-12 - SUŠÍCÍ KŘIVKA MĚŘENÍ C .....	66
OBRÁZEK 4.3-13 - SUŠÍCÍ KŘIVKA MĚŘENÍ D .....	67
OBRÁZEK 4.3-14 - SUŠÍCÍ KŘIVKA MĚŘENÍ E .....	68
OBRÁZEK 4.3-15 - SUŠÍCÍ KŘIVKA MĚŘENÍ F .....	68
OBRÁZEK 4.3-16 - SUŠÍCÍ KŘIVKA MĚŘENÍ G .....	69
OBRÁZEK 4.3-17 - SUŠÍCÍ KŘIVKA MĚŘENÍ H .....	70
OBRÁZEK 4.4-1 - SROVNÁNÍ SUŠÍCÍCH KŘIVEK MĚŘENÍ I, II, III .....	70
OBRÁZEK 4.4-2 - SROVNÁNÍ SUŠÍCÍCH KŘIVEK MĚŘENÍ IV, V, VI .....	71
OBRÁZEK 4.4-3 - SROVNÁNÍ SUŠÍCÍCH KŘIVEK MĚŘENÍ VII, VIII, IX .....	71
OBRÁZEK 4.4-4 - SROVNÁNÍ SUŠÍCÍCH KŘIVEK MĚŘENÍ A – H .....	72
OBRÁZEK 5.3-1 - KRUHOVÁ ÚSEČ .....	79

## Seznam tabulek

TABULKA 1.4.1-1 - VÝHŘEVNOST RŮZNÝCH DRUHŮ BIOMASY .....	14
TABULKA 1.4.3-1 - SLOŽENÍ BIOMASY .....	17
TABULKA 2.4-1 - SROVNÁNÍ ENERGETICKÉ SPOTŘEBY RŮZNÝCH SUŠÁREN .....	29
TABULKA 3.1-1 - HODNOTY C A X PRO RŮZNÉ SUŠÁRNY .....	32
TABULKA 3.3-1 - PARAMETRY SUŠENÉHO LOŽE .....	41
TABULKA 3.3-2 - VÝPOČTY PRO SUŠENÉ LOŽE .....	41
TABULKA 3.3-3 - ZÁVISLOST TEPelnÉ VODIVOSTI, SOUČ. PROSTUPU TEPLA A TEPelnÉHO TOKU NA ÚBYTKU VODY .....	42
TABULKA 3.3-4 - ZÁVISLOST SOUČINITELE U NA VELIKOSTI ČÁSTIC BIOMASY .....	44
TABULKA 3.3-5 - ZÁVISLOST TEPelnÉHO TOKU Q NA ZAPLNĚNÍ .....	45
TABULKA 4.1-1 - ROZMĚRY EXPERIMENTÁLNÍ SUŠÁRNY .....	48
TABULKA 4.2-1 - EXPERIMENTY SUŠENÍ MULČOVACÍ KŮRY VHLČENÉ .....	53
TABULKA 4.2-2 - EXPERIMENTY SUŠENÍ MULČOVACÍ KŮRY NEVLHČENÉ .....	53
TABULKA 4.2-3 - EXPERIMENTY SUŠENÍ KRMNÝCH GRANULÍ .....	53
TABULKA 5.1-1 - ZADÁNÍ NÁVRHU SUŠÁRNY .....	74
TABULKA 5.3-1 - KONSTANTY A VOLENÉ PROMĚNNÉ PRO TEORETICKÝ VÝPOČET PROSTUPU TEPLA .....	77
TABULKA 5.3-2 - SOUVISEJÍCÍ NÁVRHOVÉ PROMĚNNÉ PRO VÝPOČET PROSTUPU TEPLA .....	78
TABULKA 5.4.3-1 - SROVNÁNÍ ROZMĚRŮ NAVRŽENÉ SUŠÁRNY DLE TEORIE A DLE EXPERIMENTÁLNĚ ZJIŠTĚNÉ ODPAŘIVOSTI .....	84
TABULKA 5.4.3-2 - SROVNÁNÍ Vlivu ZMĚNY TEPLoty OTOPU ČI ZAPLNĚNÍ NA ROZMĚRY SUŠÁRNY A DOBU SUŠENÍ .....	84