

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2020

**TOMÁŠ
BRYCHTA**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Brychta** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **457640**
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 kontaktních sušárnách

Název diplomové práce anglicky:

Biomass drying in contact dryers

Pokyny pro vypracování:

Určete zásadní parametry ovlivňující proces kontaktního sušení a na základě teoreticky vypočtených a experimentálně určených výsledků sušících charakteristik vyhodnoťte jejich vliv na proces sušení a návrh kontaktních sušáren. Práce bude obsahovat:

1. Zpracování rešerše vhodných způsobů sušení a typů sušek používaných pro biomasu.
2. Teoretický popis výpočtu přestupu tepla pro kontaktní sušení a určení zásadních parametrů ovlivňujících tento proces.
3. Provedení série experimentů pro kontaktní sušení biomasy a jejich vyhodnocení.
4. Porovnání experimentálních a teoretických výsledků sušících charakteristik a vyhodnocení vlivu zásadních parametrů ovlivňujících tento proces a návrh kontaktních sušáren.

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:

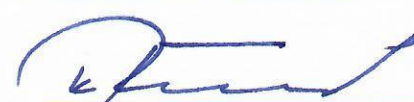
Datum zadání diplomové práce: **22.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **26.06.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2021**


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


podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

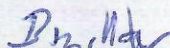

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

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.

23.6.2020

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne 26. 6. 2020

Brycht
.....

podpis

Jméno autora: Bc. Tomáš Brychta

Název DP: Sušení biomasy v kontaktních sušárnách

Anglický název: Biomass drying in contact dryers

Akademický rok: 2019/2020

Ústav/Odbor: Ústav energetiky/Energetika

Vedoucí DP: Ing. Jan Havlík, Ph.D.

Konzultant:

Bibliografické údaje: Počet stran: 98
Počet obrázků: 18
Počet tabulek: 33
Počet příloh: 1

Klíčová slova: Biomasa, principy sušení, typy sušáren, kontaktní sušení, krmné granule, mulčovací kůra, dřevní štěpka

Keywords: Biomass, drying principles, types of dryers, contact drying, compound feed, mulch, wood chips

Anotace: Diplomová práce se zabývá sušením biomasy. Jsou v ní popsány způsoby sušení a různé typy sušáren. Hlavním předmětem práce je sušení kontaktní, jenž je teoreticky popsáno ve vlastní kapitole. Dále jsou v práci uvedena data experimentálních měření a jejich vyhodnocení. Na základě teorie kontaktního sušení je v prostředí MATLAB vytvořeny výpočtový model a výsledky jsou srovnány s výsledky experimentů. Na závěr práce je zkoumán vliv změny provozních parametrů na průběh sušení.

Abstract: This diploma thesis describes the drying of biomass. It describes methods of drying and various types of dryers. The main subject of the thesis is contact drying, which is theoretically described in its own chapter. Furthermore, the thesis presents data of experimental measurements and their evaluation. Based on the theory of contact drying, a computational model is created in MATLAB and the results are compared with results from experiments. At the end of the thesis, the influence of changes of operational parameters on drying process is investigated.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Janu Havlíkovi, Ph.D. za čas, který mi věnoval, jeho příkladné a trpělivé vedení, za cenné konzultace a připomínky a celkově za vstřícný přístup. Dále bych chtěl poděkovat rodině za podporu v průběhu celého studia a v neposlední řadě děkuji i přátelům, jež mi poskytli potřebné odreagování.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	8
1. Úvod.....	11
2. Biomasa.....	12
2.1. Dělení biomasy.....	12
2.2. Legislativní definice biomasy	12
2.3. Fyzikálně-chemické vlastnosti biomasy	13
2.3.1. Složení biomasy.....	13
2.3.2. Výhřevnost a spalné teplo.....	14
2.3.3. Voda v biomase	16
2.3.4. Adsorpce a desorpce.....	17
3. Princip a metody sušení	18
3.1. Pasivní sušení	18
3.2. Aktivní sušení	18
3.3. Základy sušení	19
3.3.1. Faktory ovlivňující sušení	19
3.3.2. Statika sušení.....	21
3.3.3. Kinetika sušení.....	22
3.4. Sušárny.....	23
3.5. Vybrané druhy sušáren	25
3.5.1. Komorová sušárna.....	25
3.5.2. Pásová sušárna	26
3.5.3. Bubnová rotační sušárna.....	27
3.5.4. Proudová sušárna.....	27
3.5.5. Fluidní sušárna	28
3.5.6. Válcová sušárna.....	29
3.5.7. Lopatková sušárna	30

3.6.	Porovnání sušáren.....	31
4.	Prostup tepla u kontaktních sušáren	33
4.1.	Parametry ovlivňující sušení	40
5.	Experimentální měření s kontaktní sušárnou	42
5.1.	Popis měřících zařízení.....	42
5.2.	Průběh měření	42
5.3.	Seznam a parametry měření.....	47
5.4.	Vzorové vyhodnocení měření	48
5.4.1.	Rozměrové charakteristiky sušárny	48
5.4.2.	Měření obsahu vody ve vzorcích.....	48
5.4.3.	Bilance materiálu	49
5.4.4.	Průběh hmotnosti v čase a množství odebrané elektřiny.....	50
5.4.5.	Sušící křivka	52
5.4.6.	Určení měrných odpařivostí a energetické náročnosti.....	53
5.4.7.	Účinnost sušení	53
5.5.	Souhrnné vyhodnocení měření.....	55
6.	Srovnání teoretických a experimentálních výsledků sušení.....	61
6.1.	Parametry používané při teoretických výpočtech	61
6.2.	Srovnání výsledků experimentů a teorie	62
7.	Vliv parametrů sušení či materiálu na průběh sušení.....	65
8.	Závěr	71
	Zdroje.....	73
	Příloha A: Vyhodnocení jednotlivých měření.....	74
	Seznam obrázků	95
	Seznam grafů.....	96
	Seznam tabulek	98

Seznam použitých symbolů a zkratk

$c_{p,bed}$	$[J \cdot K^{-1}]$	tepelná kapacita vrstvy materiálu
$c_{p,L}$	$[J \cdot K^{-1}]$	tepelná kapacita vody
$c_{p,M}$	$[J \cdot K^{-1}]$	tepelná kapacita sušeného materiálu
d	$[m]$	průměr
	$[m]$	ekvivalentní průměr částice
f	$[-]$	popelový faktor
g	$[m \cdot s^{-2}]$	tíhové zrychlení
h	$[-]$	poměrný obsah hořlaviny
h'	$[-]$	skutečný obsah hořlaviny
h_f	$[W \cdot m^{-2} \cdot K]$	součinitel prostupu tepla ze stěny do materiálu
h_{fp}	$[W \cdot m^{-2} \cdot K]$	součinitel prostupu tepla jedné částice
h_h	$[W \cdot m^{-2} \cdot K]$	součinitel prostupu tepla mezi médii a stěnou
h_m	$[W \cdot m^{-2} \cdot K]$	součinitel prostupu tepla sušeného materiálu
h_{rad}	$[W \cdot m^{-2} \cdot K]$	součinitel sálání
h_v	$[W \cdot m^{-2} \cdot K]$	součinitel prostupu tepla na povrchu materiálu
h_w	$[W \cdot m^{-2} \cdot K]$	součinitel prostupu tepla otápné stěny
i_{MA}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	entalpie sušeného materiálu
i_{SM}	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	entalpie sušícího média
l	$[m]$	modifikovaná střední volná cesta molekul plynu
m	$[kg]$	hmotnost
m_S	$[kg]$	hmotnost sušiny
\dot{m}_S	$[kg_W \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}]$	měrná plošná odpařivost
\dot{m}_V	$[kg_W \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}]$	měrná objemová odpařivost
m_W	$[kg]$	hmotnost vody
n	$[1/min]$	otáčky míchadla
p	$[Pa]$	tlak
t	$[s]$	čas setrvání
t_c	$[s]$	kritická doba kontaktu materiálu se stěnou
t_{mix}	$[s]$	doba jedné otáčky míchadla
t_R	$[s]$	doba potřebná pro dokonalé promíchání materiálu
x	$[-]$	konstanta

A	$[-]$	poměrný obsah popela
	$[m^2]$	plocha
C	$[-]$	konstanta
C_1	$[-]$	konstanta
C_{12}	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$	celkový radiační součinitel
C_{shape}	$[-]$	faktor tvaru
D	$[m]$	průměr bubnu
D_{shape}	$[-]$	faktor tvaru pro intersticiální přenos molekul. Tokem
$E_{el/kgw}$	$[kJ \cdot kg_w^{-1}]$	energetická náročnost sušení
Fr	$[-]$	Froudeho číslo
M	$[-]$	poměrný obsah popelovin
	$[Da]$	relativní molekulová hmotnost
M_{dry}	$[kg]$	hmotnost sušiny
M_{MA}	$[kg]$	hmotnost sušeného materiálu
M_{SM}	$[kg]$	hmotnost sušicího média
N_{mix}	$[-]$	míchací číslo
N_{therm}	$[-]$	míchací číslo
R	$[J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}]$	univerzální plynová konstanta
R_{shape}	$[-]$	faktor tvaru pro intersticiální přenos energie radiací
V	$[-]$	poměrný obsah prchavé hořlaviny
Q	$[W]$	tepelný tok
$Q_{celk_{teor}}$	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	celkové teoretické potřebné teplo
Q_i	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	výhřevnost
$Q_{ohřev_{teor}}$	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	teoretické potřebné teplo k ohřevu materiálu
Q_s	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	spalné teplo
$Q_{vypař_{teor}}$	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	teoretické potřebné teplo k vypaření obsahu vody
T	$[K]$	teplota
T_b	$[K]$	teplota sušeného materiálu
T_m	$[K]$	teplota zářícího povrchu
T_s	$[K]$	teplota vypařování
T_w	$[K]$	teplota otopné stěny
U	$[W \cdot m^{-2} \cdot K]$	celkový součinitel prostupu tepla
U_{∞}	$[W \cdot m^{-2} \cdot K]$	celk. souč. prostupu tepla v míchané vrstvě materiálu
U_{wet}	$[W \cdot m^{-2} \cdot K]$	celk. součinitel prostupu tepla vlhkého materiálu
U_{dry}	$[W \cdot m^{-2} \cdot K]$	celk. součinitel prostupu tepla suchého materiálu

V	$[m^3]$	objem
W	$[-]$	poměrný obsah vody
W_t	$[-]$	poměrný obsah veškeré vody
X	$[kg \cdot kg^{-1}]$	měrná vlhkost
X_s	$[kg \cdot kg^{-1}]$	měrná vlhkost materiálu
X_{MA}	$[kg \cdot kg^{-1}]$	měrná vlhkost sušeného materiálu
X_{SM}	$[kg \cdot kg^{-1}]$	měrná vlhkost sušicího média
γ	$[-]$	koeficient přizpůsobení
δ	$[\mu m]$	drsnost povrchu
ε_{bed}	$[-]$	emisivita povrchu vrstvy sušeného materiálu
ε_{wall}	$[-]$	emisivita otápné stěny
ε	$[-]$	emisivita
ζ	$[-]$	koeficient bezrozměrné pozice fázové změny
λ	$[J \cdot kg^{-1}]$	měrné skupenské teplo varu
λ_{bed}	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	tepelná vodivost vrstvy materiálu
λ_s	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	tepelná vodivost částice
λ_D	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	součinitel tep. vodivosti v závislosti na tlaku
λ_G	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	tepelná vodivost plynu
λ_R	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	součinitel tep. vodivosti v závislosti na radiaci
μ	$[N \cdot s \cdot m^{-2}]$	dynamická viskozita
ξ_1	$[-]$	distribuční koeficient
ξ_r	$[-]$	koeficient rozložení částic
ρ_{bed}	$[kg \cdot m^{-3}]$	hustota vrstvy sušeného materiálu
σ	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$	Stefanova-Boltzmannova konstanta
τ	$[-]$	bezrozměrná doba kontaktu materiálu se stěnou
τ_R	$[s]$	doba setrvání
φ	$[\%]$	relativní vlhkost vzduchu
ϕ_A	$[-]$	faktor pokrytí povrchu
ϕ_K	$[-]$	koeficient přívodu tepla
ψ	$[-]$	pórovitost
Λ	$[m]$	střední volná cesta molekul plynu

1. Úvod

Sušení biomasy se uplatňuje v širokém rozmezí oborů. S problematikou snižování obsahu vody vstupních materiálů, meziproductů nebo produktů, jenž můžeme označit jako biomasu, se můžeme setkat například i v zemědělství, dřevozpracujícím průmyslu nebo třeba v potravinářství. Za sušení biomasy můžeme označit dokonce i přirozené (pasivní) sušení palivového dříví na vzduchu, které lidstvo praktikuje již tisíce let.

Před nástupem fosilních paliv byla biomasa, konkrétně dřevo, ve své podstatě jediným zdrojem tepelné energie. V posledních letech biomasa opět nabývá na svém významu, a to nejen dřevo, ale také další plodiny, suroviny, produkty či odpady, které můžeme jako biomasu označit.

Ať už biomasu chceme využít energeticky či jinak, vysoký obsah vody je problematický. Při spalování voda významným způsobem snižuje výhřevnost paliva a od hranice 55 procent obsahu vody považujeme biomasu jako nespalitelnou. Zároveň je díky velkému obsahu vody významně zvýšen objem spalin. Z těchto důvodů je důležité obsah vody v biomase snižovat.

Na úvod této diplomové práce základním způsobem vysvětlím pojem biomasa, jak se dělí, z čeho se skládá a také nastíním, jak na biomasu pohlížíme z hlediska legislativy. Dále obecně vysvětlím principy sušení a uvedu příklady sušáren a jejich následné porovnání.

V další části práce se zaměřím na konkrétní způsob sušení – kontaktní sušení. To popíši teoreticky a následně výsledky získané z těchto teoretických výpočtů porovnam s experimentálně získanými hodnotami. Na závěr práce porovnam vliv jednotlivých parametrů sušení či sušeného materiálu na průběh sušení.

2. Biomasa

Pojmem biomasa rozumíme veškerý materiál organického původu, tedy materiál obsahující uhlovodíky. Obecně biomasou rozumíme veškerou rostlinnou biomasu pěstovanou v půdě a ve vodě, živočišnou biomasu (zoomasu) a zbytky a produkty jejich existence. [1] Patří sem i veškerý materiál, jenž vzniknul jejich technologickou přeměnou, například odpady z jatek nebo papír. V neposlední řadě do této kategorie řadíme také odumřelou, ale nikoliv fosilní fytomasu a zoomasu. Hranici v tomto případě tvoří rašelina, která u nás za biomasu považována není, ale například finská legislativa ji do této kategorie zahrnuje [2].

2.1. Dělení biomasy

Biomasu dělíme na dvě základní skupiny – primární biomasu a sekundární biomasu. Primární biomasou rozumíme veškeré materiály, které vznikly přímou fotosyntézou. Do této skupiny patří veškerá rostlinná biomasa, ale také veškeré zbytky lesního a zemědělského hospodaření. Primární biomasu následně dělíme na fytomasu (cíleně pěstovaná biomasa, rostlinné zbytky ze zemědělské prvovýroby a údržby krajiny, trvalé travní porosty) a na dendromasu (palivové dřevo, zbytky lesního hospodářství).

Sekundární biomasou označujeme organické produkty bez přímého působení slunce ve vyšších organismech.

Ostatní primární biomasou rozumíme zbytky z průmyslové výroby (potravinářský průmysl, papírenství, lihovarnictví, ...) nebo například čistírenské kaly a jiné biologicky rozložitelné odpady [2].

2.2. Legislativní definice biomasy [2], [3], [4], [5]

V české legislativě se definice biomasy vyskytuje hned v několika případech.

Ve vyhlášce 415/2012 Sb. [3] se biomasou rozumí produkt, který je tvořen z rostlinného materiálu pocházejícího ze zemědělství nebo lesnictví a který lze použít jako palivo za účelem získání jeho energetického obsahu, a dále následující odpad použitý jako palivo:

- 2.2.1. rostlinný odpad ze zemědělství nebo lesnictví,
- 2.2.2. rostlinný odpad z potravinářského průmyslu, pokud se využije vyrobené teplo,
- 2.2.3. rostlinný odpad z výroby čerstvé vlákniny a z výroby papíru z buničiny, pokud se spaluje v místě výroby a vzniklé teplo se využije,

2.2.4.korkový odpad,

2.2.5.dřevný odpad s výjimkou dřevného odpadu, který může obsahovat halogenové organické sloučeniny nebo těžké kovy v důsledku ošetření látkami na ochranu dřeva nebo nátěrovými hmotami, zahrnující především takovéto dřevné odpady pocházející ze stavebnictví a z demolic.

Z hlediska ekonomické stránky energetického využití biomasy je vhodné se zaměřit na zákon 165/2012 Sb. [4] o podporovaných zdrojích energie, kde je pojem biomasa definován jako biologicky rozložitelná část produktů, odpadů a zbytků biologického původu z provozování zemědělství a hospodaření v lesích a souvisejících průmyslových odvětvích, zemědělské produkty pěstované pro energetické účely a biologicky rozložitelná část průmyslového (BRPO) a komunálního (BRKO) odpadu.

Dále ve vyhlášce 477/2012 Sb. [5] sice není biomasa nebo biologicky rozložitelný materiál přesně definován, zato je zde podíl biologicky rozložitelných složek v komunálním odpadu stanoven pevně na 60%, pokud výrobce energie neprokáže vyšší podíl, je zde specifikován pojem cíleně pěstovaná biomasa a v příloze jsou zařazeny druhy biomasy, které jsou předmětem podpory, do tří kategorií a způsoby jejího využití.

2.3. Fyzikálně-chemické vlastnosti biomasy

Budeme-li s biomasou pracovat jako s palivem, můžeme na její posouzení využít stejné postupy a parametry jako je tomu u tradičních paliv jako je třeba uhlí.

2.3.1.Složení biomasy

U každého paliva můžeme pomocí hrubého rozboru stanovit obsah vody (W), popela (A) a hořlaviny (h). Součet poměrných obsahů těchto složek musí být roven jedné.

$$h + A + W = 1 \quad (2.3.1.1)$$

Z hlediska sušení je pro nás nejdůležitější složkou obsah vody. Pro biomasu je typický proměnný a vzhledem k tradičním palivům vysoký obsah vody, který významnou měrou ovlivňuje výhřevnost paliva nebo i její vlastnosti při skladování či přepravě. Voda je v materiálu vázána různými způsoby.

Jako W_t označujeme vodu veškerou, která je součtem podílu vody hrubé a vody zbylé. Vodu okludovanou (adsorbovanou na hořlavinu paliva) zahrnujeme do prchavé hořlaviny a vodu hydrátovou (krystalovou vodu minerálů) řadíme k popelovinám [6].

Výhodou biomasy je nízký obsah popelovin (dřevo přibližně 0,5 %, sláma až 6 %). Do této kategorie musíme započítat i případné vnější nečistoty. U popela je důležité prvkové složení a jeho vlastnosti, zejména charakteristické teploty. Rozdíl mezi popelovinami M a popelem je v tom, že popel je zbytek po žíhání vzorku paliva, zatímco popeloviny jsou minerální část surového paliva. Z jejich poměru v případě potřeby určujeme tzv. popelový faktor f .

$$f = M/A \quad (2.3.1.2)$$

Nejdůležitější složkou paliva je zajisté hořlavina. Ta se skládá z aktivních prvků – uhlíku C, vodíku H a síry S – a z pasivních prvků – kyslíku O a dusíku N. Z hlediska spalování dělíme hořlavinu na tuhý a prchavý podíl.

Biomasa obsahuje významné množství prchavé složky hořlaviny V a je pro ni tedy typický dlouhý plamen. Poměrný obsah hořlaviny určujeme početně jako doplněk součtu poměrného obsahu veškeré vody a popela na 100 %.

$$h = 1 - (W + A) \quad (2.3.1.3)$$

Pokud chceme obsah hořlaviny určit výpočetně přesně, můžeme respektovat vliv popelového faktoru.

$$h' = h - A \cdot (1 - f) \quad (2.3.1.4)$$

Tato korekce je však nutná pouze pro paliva s větším obsahem popela (přibližně $A \geq 10\%$) a u biomasy ji tak ve většině případů můžeme zanedbat.

Obsahy složek či prvků se udávají v takzvaných stavech, které jsou označeny horním indexem u základního symbolu. Rozeznáváme pět stavů, mezi kterými můžeme obsahy vzájemně přepočítávat. Jsou jimi původní stav r , analytický vzorek a , bezvodné palivo d , hořlavinu (zdánlivou) daf a organickou hmotu (skutečnou hořlavinu) o .

2.3.2. Výhřevnost a spalné teplo

Nejdůležitější vlastností jakéhokoliv paliva je jeho výhřevnost Q_i . Ta je definována jako množství tepla, které se uvolní dokonalým spálením 1 kg (1 Nm³) paliva při ochlazení spalin na standardní výchozí teplotu 20 °C, přičemž vzniklá vodní pára nezkondenzuje.

Spalné teplo Q_s je celkové latentní chemicky vázané teplo v palivu vztažené ke $20\text{ }^\circ\text{C}$ včetně kondenzačního tepla vodní páry ve spalinách z paliva. Jednotkami těchto tepel jsou v závislosti na použitém typu paliva (pevné/plynné) kJ/kg^{-1} či kJ/Nm^3 . Namísto kJ může být v případě potřeby využita jednotka kWh .

Vztah mezi spalným teplem a výhřevností je

$$Q_i = Q_s - 2453 \cdot (W + 8,94 \cdot H), \quad (2.3.2.1)$$

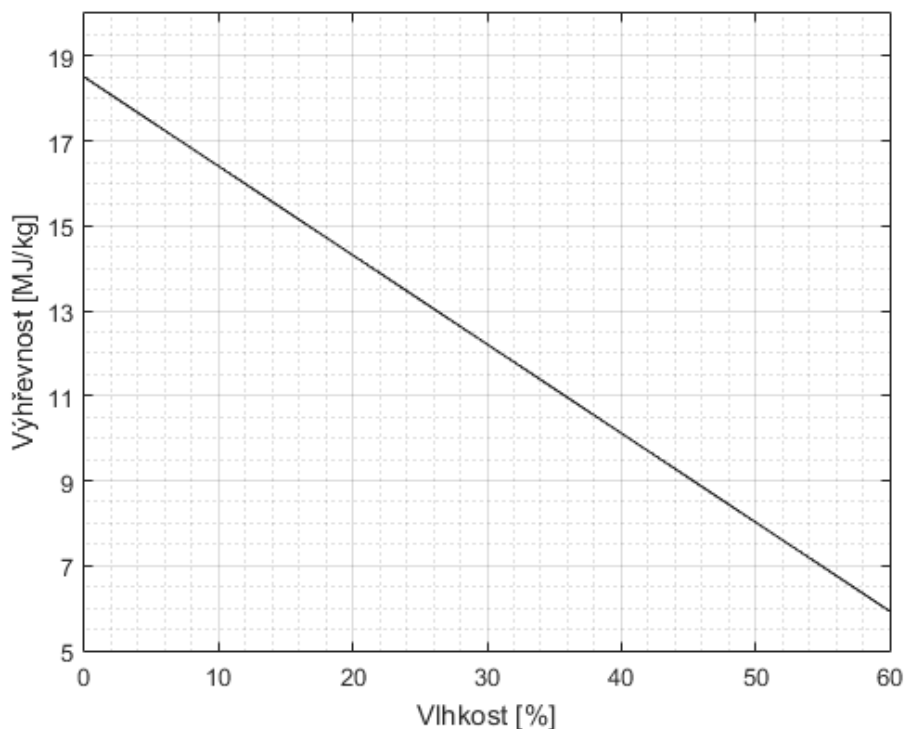
kde W představuje obsah vody v palivu, H obsah vodíku v palivu a 2453 je měrné skupenské teplo vodní páry [6].

Výhřevnost jakéhokoliv paliva je tedy významně závislá na obsahu vody. Rostlinná biomasa s nulovým obsahem vody má díky svému složení maximální výhřevnost sušiny přibližně $18,5\text{ MJ}/\text{kg}$. Budeme-li pro jednoduchost uvažovat materiál bez obsahu vodíku, můžeme jednoduše zanást do grafu alespoň orientační závislost výhřevnosti na obsahu vody.

Pro bezvodný stav můžeme psát $Q_i^d = Q_s^d = 18,5\text{ MJ}/\text{kg}$ a další stavy dopočítáme tak, převedeme-li spalné teplo pro příslušnou vlhkost pomocí vztahu

$$Q_s^r = Q_s^d \cdot (1 - W_t^r) \quad (2.3.2.2)$$

a následně dosadíme do vztahu (2.3.2.1). Získáváme následující závislost:



Graf 1: Závislost výhřevnosti na vlhkosti

Můžeme vidět, že průměrná biomasa s obsahem veškeré vody 55 % má výhřevnost 7 000 kJ/kg, což je přibližně hranice spalitelnosti, protože uvolněné teplo již nedokáže vypařit tento vysoký obsah vody a zároveň iniciovat vznícení prchavé hořlaviny.

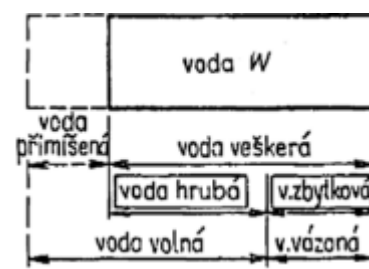
Reálné hodnoty výhřevnosti jsou vzhledem k přítomnosti vodíku v biomase (přibližně 5 až 7 %) nižší.

2.3.3. Voda v biomase

Ať už chceme biomasu využít přímo jako palivo, nebo ji potřebujeme pouze dlouhodoběji uskladnit, měli bychom z ní odstranit vlhkost. Musíme však mít na mysli, zda pro nás má sušení smysl z energetického, a tudíž i z ekonomického, hlediska smysl. Snížení obsahu vody na velmi nízké hodnoty je energeticky náročné a ve výsledku můžeme sušením ztratit více energie, než následně získáme například spálením této dokonale vysušené biomasy namísto vlhčího materiálu.

Sušení můžeme charakterizovat jako fyzikální proces odstraňování nežádoucí vody z příslušného materiálu do ovzduší pomocí její fázové přeměny – odpaření či sublimace. Při samotném sušení vlhkých materiálů probíhají vzájemně provázané procesy přenosu tepla (sušení materiálu) a hmoty (odvod vlhkosti) [7], [8].

Jak jsem již uvedl v kapitole 2.3.1, voda je v biomase vázána v několika různých formách. Z pohledu sušení, resp. z hlediska náročnosti odstranění vlhkosti, můžeme říct, že se jedná o vlhkost volnou a vázanou.



Obrázek 1: Voda v biomase; převzato z [6]

Volná vlhkost, jak můžeme vidět na obrázku 1, tvoří většinu veškerého obsahu vody v materiálu. Její vlastností je, že není nijak spojena s molekulami látky, a tudíž se v ní může volně pohybovat. Nachází se na povrchu materiálu a v jeho pórech či makrokapilárách. Díky tomu je tato vlhkost dobře odstranitelná jak sušením, tak i mechanickými způsoby jako je lisování či odstředění.

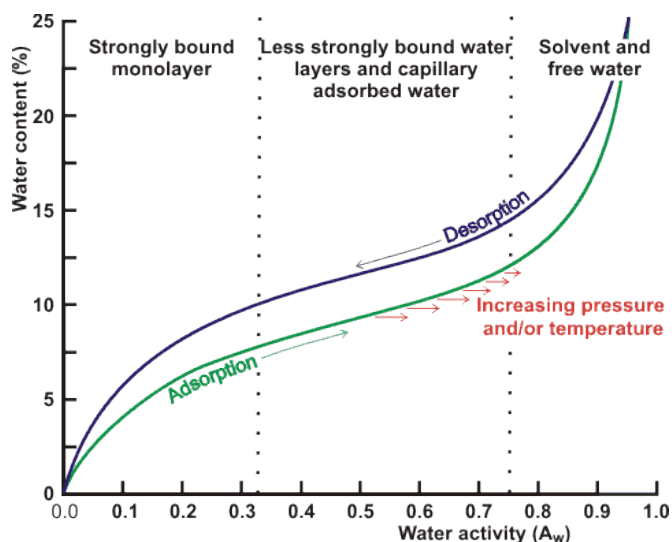
Naproti tomu je vlhkost vázaná charakteristická svými vazbami (chemickými či fyzikálně-chemickými) do molekul materiálu. Platí pro ni také následující vlastnosti:

- slabě nebo vůbec nerozpouští látky, které jsou rozpustné ve volné vodě, a je neelektrovedivá
- měrná kapacita je přibližně rovna měrnému teplu ledu
- zamrzá při velmi nízkých teplotách
- ve srovnání s volnou vlhkostí má vyšší hustotu [8]

2.3.4. Adsorpce a desorpce

Každá látka má určitou schopnost zadržovat či uvolňovat vodu z okolního prostředí. Můžeme rozlišit látky hydroskopické (snadno zachycují vzdušnou vlhkost) a látky nehydroskopické. Tato vlastnost materiálu zadržovat vodu je charakterizována rovnovážnou vlhkostí, jenž je závislá na teplotě a vlhkosti okolního prostředí. Jedná se o stav, kdy se tlak vodní páry nad materiálem bude rovnat parciálnímu tlaku vodní páry v okolním prostředí.

Grafickým znázorněním získáváme sorpční izotermu materiálu. Dosáhneme-li rovnovážného stavu adsorpcí z okolí do materiálu, získáváme adsorpční izotermu. Naopak při odevzdání vlhkosti do okolního prostředí získáváme izotermu desorpční [8], [9].



Graf 2: Závislost měrné vlhkosti materiálu na relativní vlhkosti vzduchu; převzato z [9]

Na grafu 2 můžeme vidět závislost měrné vlhkosti materiálu X, na relativní vlhkosti (v grafu water activity) φ . Můžeme z něj vyčíst nejmenší měrnou vlhkost, na kterou lze materiál vysušit při dané relativní vlhkosti prostředí.

3. Princip a metody sušení

Jak jsem již zmínil v úvodu, existují dva hlavní způsoby sušení biomasy. Jedná se o tzv. sušení pasivní a sušení aktivní.

3.1. Pasivní sušení

Pasivním sušením rozumíme sušení materiálu přirozeným prouděním vzduchu v místě, kde je chráněn před deštěm. Výhodou tohoto způsobu je zejména jeho energetická nenáročnost, která je však vyvážena dlouhou dobou samotného sušení a v neposlední řadě také velkou prostorovou náročností u většího množství sušeného materiálu.

Tento způsob sušení je typický pro domácí sušení palivového dřeva, kde jsme schopni dosáhnout nejnižší zhruba 20 % vlhkosti, která je však již dostačující pro výsledné využití materiálu.

3.2. Aktivní sušení

Aktivní sušení je proces sušení, kde využíváme přivedeného tepla ze zdroje energie, ať už se jedná o přímý zdroj či využití odpadního tepla. Výhodou je významné zkrácení celého procesu sušení a nižší výsledné vlhkosti materiálu.

Teplo můžeme do sušáren přivádět třemi základními způsoby:

- konvektivní sušení (prouděním, přímé):

Přenos tepla je zprostředkován pomocí sušícího média – vzduchu, spalinami, párou či inertními plyny – procházející vrstvou biomasy. Toto médium slouží také k odvodu vlhkosti z prostoru sušky.

- konduktivní sušení (vedením, nepřímé):

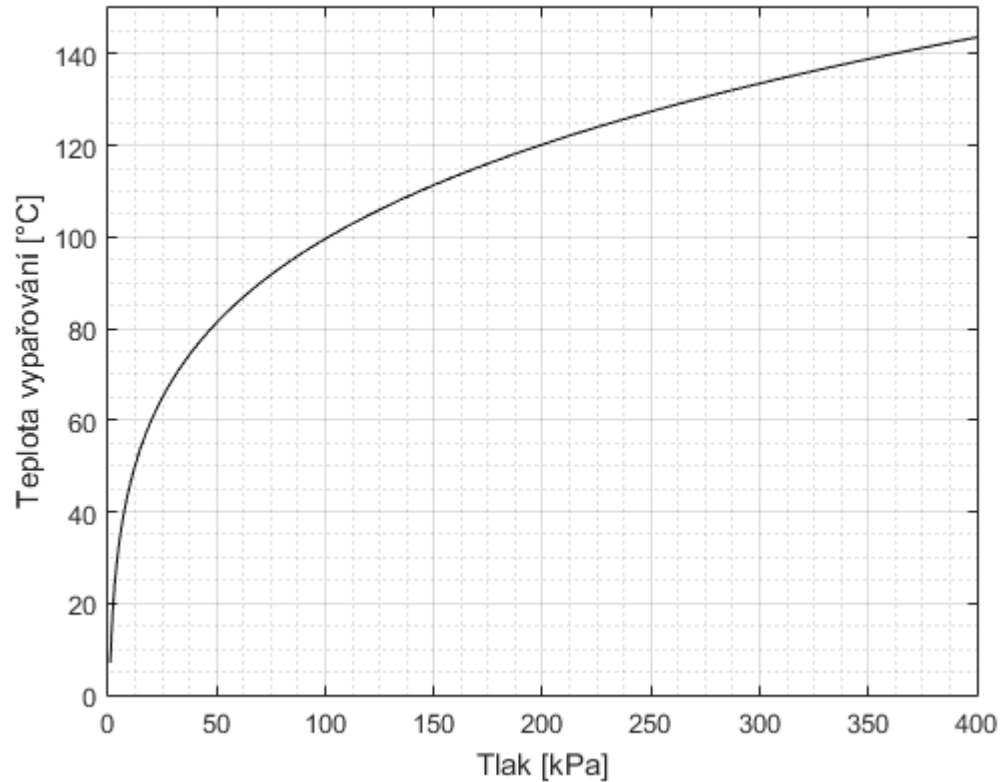
U tohoto způsobu sušení je přenos tepla umožněn přímým kontaktem sušeného materiálu a kontaktní plochy sušky. Úkolem sušícího média je zde pouze odvod vlhkosti.

- radiační sušení (zářením):

Jedná se o přenos energie zářením. Výhodou je, že elektromagnetické vlny se mohou šířit i ve vakuu.

Nemusí se také vždy jednat o takzvané vysokoteplotní sušení, kde teploty v sušce přesahují teploty 100 °C. Sušený materiál můžeme zmrazit a následně nechat vodu vysublímovat – sublimační sušení.

Nezanedbatelný je také například vliv tlaku na teplotu varu vody.



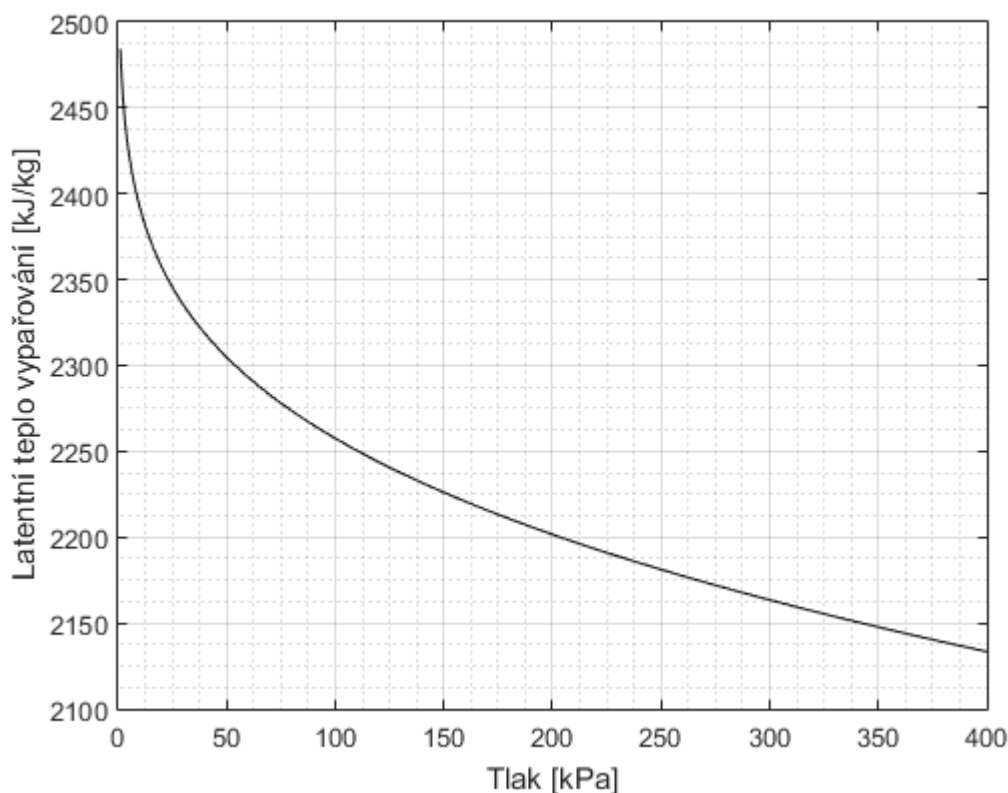
Graf 3: Závislost teploty varu vody na tlaku

3.3. Základy sušení

3.3.1. Faktory ovlivňující sušení

Jak jsem již naznačil v předchozích odstavcích, teplota je jedním ze základních parametrů ovlivňující proces sušení. Vyšší maximální teplota sušení samozřejmě urychluje proces vypařování vody z materiálu, ale zároveň zvyšuje energetickou náročnost procesu, jelikož úměrně s ní rostou i tepelné ztráty. Také musíme myslet na to, že by za vyšších teplot mohlo dojít i k určitému poškození sušeného materiálu.

Jak můžeme vidět v grafu 3, nutnou teplotu pro vypaření vody můžeme snížit snížením tlaku vývěvou. Nevýhodami jsou, že do celkové energetické náročnosti musíme připočítat i vlastní spotřebu vývěvy a že s klesajícím tlakem roste latentní teplo vypařování.



Graf 4: Vliv tlaku na latentní teplo vypařování

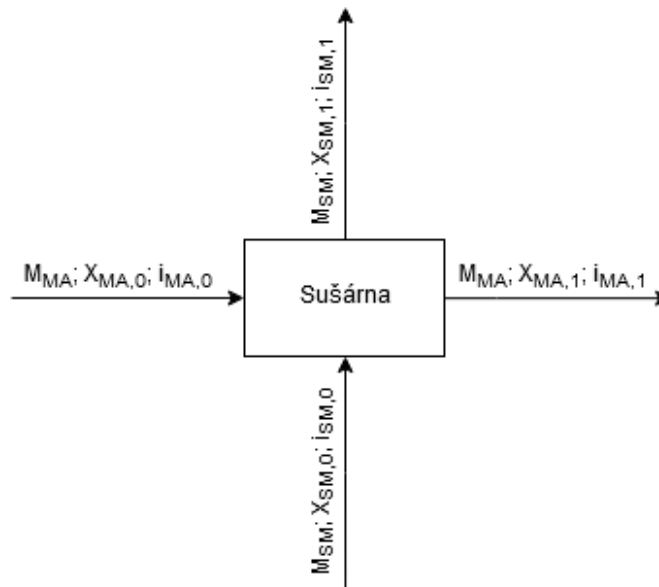
Dalším faktorem, jenž ovlivňuje rychlost sušení, je například rychlost proudění sušicího média. Čím vyšší je tato rychlost, tím lepší je přestup tepla mezi materiálem se sušicím médiem a sušení probíhá rychleji. Dosáhneme-li prahové rychlosti fluidace pro daný materiál, přejdou jeho částice do vzletu a bude se jednat o tzv. fluidní sušení.

Nezanedbatelný vliv má také zaplnění sušárny. Pokud je vysoká vrstva materiálu v sušce, bude na daný objem materiálu relativně malá plocha styku se sušicím médiem, a tudíž dojde k pomalejšímu zahřátí celého objemu materiálu. S tímto případným problémem pomáhá přítomnost míchadla.

Samozřejmostí jsou i vlastnosti samotného sušeného materiálu, které však povětšinou nemůžeme nijak měnit.

3.3.2. Statika sušení

Prvním způsobem, jímž můžeme sušení popsat je tzv. statika sušení – bilance materiálu (označeným indexem MA) a sušícího média (SM). Číslo v indexu značí stav na vstupu (0) či na výstupu (1).



Obrázek 2: Statika sušení

Z pohledu přenosu energie a hmoty se dá sušení popsat následujícími rovnicemi.

- Bilance hmoty:

$$M_{MA} \cdot X_{MA,0} + M_{SM} \cdot X_{SM,0} = M_{MA} \cdot X_{MA,1} + M_{SM} \cdot X_{SM,1} \quad (3.3.2.1)$$

- Průtok hmoty:

$$M_{MA} \cdot (X_{MA,0} - X_{MA,1}) = M_{SM} \cdot (X_{SM,1} - X_{SM,0}) \quad (3.3.2.2)$$

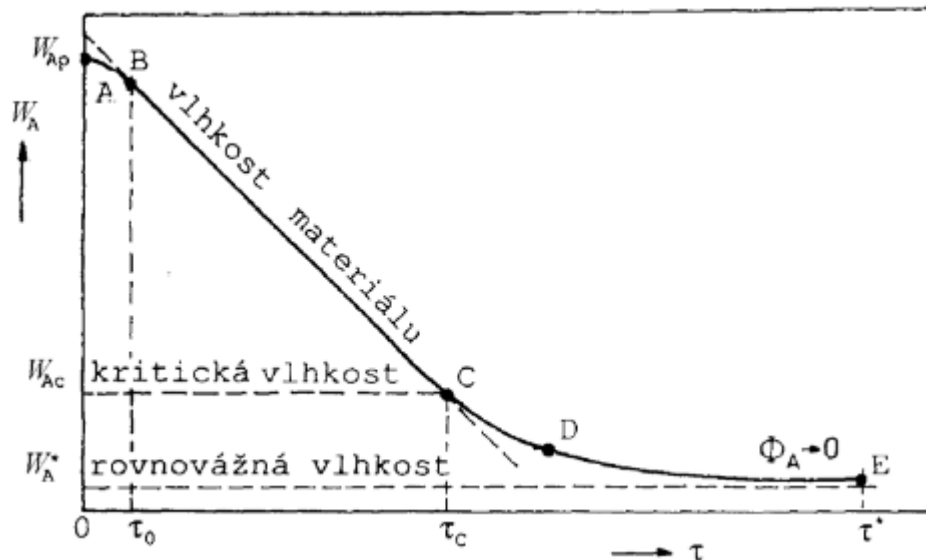
- Bilance energie:

$$Q = M_{MA} \cdot (i_{MA,1} - i_{MA,0}) + M_{SM} \cdot (i_{SM,1} - i_{SM,0}) \quad (3.3.2.3)$$

Tato bilance však platí pouze pro konvektivní sušárny, kde dochází k proudění sušícího média. V případě konduktivních (kontaktních) sušáren je sušícím médiem vzniklá vodní pára, kterou z prostoru sušárny následně odvádíme.

3.3.3. Kinetika sušení

Vyneseme-li si do grafu vlhkost materiálu v čase při sušení, získáme takzvanou sušící křivku. Sušící křivka je dána experimentem při konstantních parametrech a je pro každý materiál jiná.



Graf 5: Sušící křivka, převzata z [10]

Jak můžeme vidět, sušící křivku můžeme rozdělit na tři základní oblasti. První z nich je tzv. počáteční období. Probíhá na samotném začátku sušení, kdy se sušený materiál začne ohřívat z počáteční teploty na teplotu odpařování. Tento úsek je v grafu mezi body A a B, ale často nemusí být při experimentu vůbec zachycen.

Druhou částí je období konstantní rychlosti sušení či I. období sušení. V grafu je toto období vyznačeno jako úsek mezi body B a C. Teplota materiálu se nemění a veškeré dodané teplo se spotřebovává k odpařování volné vody u povrchu materiálu. Ta je „doplňována“ vodou z vnitřku materiálu, která difunduje k povrchu vlivem vzniklé nerovnováhy. Tento úsek probíhá konstantní rychlostí až do dosažení bodu C – kritického bodu.

V tomto okamžiku přestává povrch materiálu pokrývat souvislá vrstva kapaliny, do styku se sušícím médiem se dostanou částice pevného materiálu a rychlost sušení se začíná zpomalovat. V tomto úseku C-D nazývaném jako II. období sušení nebo období klesající rychlosti sušení se materiál začíná opět zahřívat a dochází k odpařování vázané vody.

Sušení by probíhalo až do bodu E, kde je dosaženo rovnovážné vlhkosti a veškeré děje přestupu tepla a hmoty v daném sušícím prostředí ustávají [8], [10].

Znalost sušící křivky je výhodná z pohledu optimalizace zdržení sušeného materiálu v prostoru sušky či například pro návrh délky kontinuální pásové sušárny a rychlosti posuvu materiálu.

3.4. Sušárny [8], [11]

Sušárny můžeme dělit podle velkého množství kritérií a to

- Podle režimu provozu:
 - Diskontinuální – jedná se o tzv. kampaňové sušárny, kdy se provádí sušení jednotlivých ‚sázek‘
 - Kontinuální – probíhá kontinuální vstup a výstup materiálu, který je v tělese posouván
- Podle posuvu materiálu
 - Přirozený – do této kategorie patří roštové sušárny, kdy materiál zůstává v klidu a sušárny, kdy je materiál uveden do pohybu působením sušícího média – fluidní sušárny, proudové sušárny, ...
 - Nucený – nucený pohyb materiálu můžeme rozdělit do dvou hlavních kategorií. Materiál se buď převrací (vibrační sušárna, šneková sušárna, ...) nebo je posouván dopravním zařízením (pásová sušárna, řetězová sušárna, bubnová sušárna, ...)
- Podle způsobu proudění sušícího média
 - Ofukování – sušený materiál je ofukován médiem za existence mezní vrstvy
 - Profukování – sušící médium proudí vrstvou sušeného materiálu
 - Impaktní – sušící médium proudí kolmo na povrch materiálu za rozrušení mezní vrstvy
 - V proudu – proud sušícího média poponáší částice materiálu a zcela je omývá
 - Fluidní – sušený materiál je ve vzosu způsobeným prouděním sušícího média
- Podle provozního tlaku:
 - Atmosférické – sušení probíhá za atmosférického tlaku – atmosférická sušárna
 - Vakuové – pomocí vývěvy snížíme tlak v prostoru sušárny – vakuová sušárna

- Přetlakové – přetlaková sušárna
- Podle způsobu přívodu tepla:
 - Konvektivní – konvektivní sušárna
 - Konduktivní – kontaktní sušárna
 - Sálavé – sálavá sušárna
 - Kombinované
- Podle využitého sušícího média:
 - Vzduch – jako sušící médium využíváme okolní vzduch – teplovzdušná sušárna
 - Spaliny – využíváme spaliny, což může představovat ekonomickou výhodu, naopak ale může dojít k poškození sušeného materiálu – spalinová sušárna
 - Inertní plyny – jedná se o plyny s velmi nízkou či žádnou chemickou reaktivitou (He, Ar, Xe, ...) – inertní sušárna
 - Přehřátá pára – sušárna s přehřátou parou
- Podle počtu použití sušícího média:
 - Bez recirkulace – sušící médium prochází prostorem sušky pouze jednou
 - S recirkulací – sušící médium využíváme v průběhu sušení opakovaně
- Podle směru pohybu sušícího média a sušeného materiálu:
 - Polopohybové – pohybuje se buď sušící médium nebo sušený materiál
 - Souprroudé – stejný směr pohybu sušícího média i sušeného materiálu
 - Protiproudé – směr pohybu sušícího média a sušeného materiálu je opačný
 - Křížoproudé – pohyb sušeného materiálu je kolmý na směr pohybu sušícího média
- Podle způsobu ohřevu sušícího média:
 - Elektřinou
 - Parou
 - Sluncem
 - Spalovaným palivem

- Podle konstrukce:
 - Válcové
 - Bubnové
 - Komorové
 - Šachtové
 - Tunelové
 - Pásové
 - ...

- Podle druhu sušeného materiálu:
 - Pro tuhé materiály
 - Pro pastovité materiály
 - Pro tekuté materiály

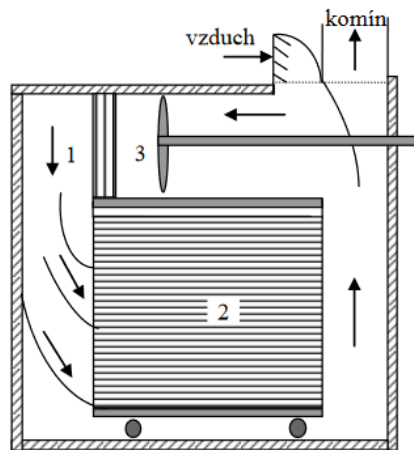
3.5. Vybrané druhy sušáren

Jak můžeme vidět v předchozí kapitole 3.4., existuje opravdu velké množství různých druhů sušáren. Proto se v této kapitole, respektive v následujících podkapitolách, zaměřím na popsání vybrané druhů sušáren, jenž následně z hlediska provozních a materiálových kritérií porovnám.

3.5.1. Komorová sušárna

Nejjednodušším druhem sušárny je komorová sušárna. Jedná se v podstatě o tepelně izolovanou skříň s nucenou cirkulací vzduchu, jehož část je společně s vzniklými parami odváděna a část dál cirkuluje v zařízení společně s nově přísátým médiem. Tato cirkulace (a zároveň rychlost sušení) je řízena klapkami na vstupu a výstupu ze zařízení. Vzduch může být ohřáto několika způsoby – zemním plynem, odporovými spirálami nebo infračervenými či mikrovlnnými zářiči.

Tato sušárna pracuje vsádkově – do prostoru se zaveze vozík s regály, na nichž je umístěna tenká vrstva sušeného materiálu. Sušení materiálu probíhá přímým sušením z povrchu, je rovnoměrné, ale energeticky náročné a jeho doba je dlouhá. Výhodou však je možnost využití pro velkou škálu materiálů. Množství sušeného materiálu v rámci jedné vsázky je dáno velikostí samotné sušárny, avšak platí, že vzhledem k principu a uspořádání jsou tato množství oproti jiným suškám malá [12].



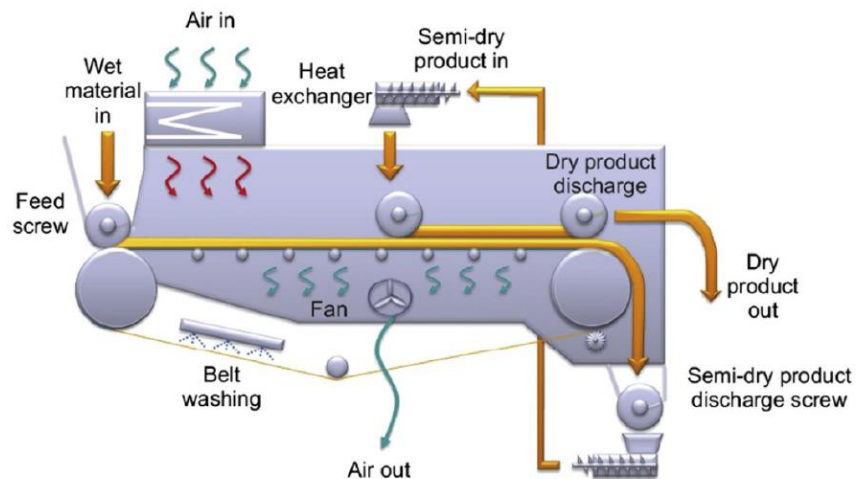
1 – kalorifer, 2 – vozík s lískami, 3 - ventilátor

Obrázek 3: Komorová sušárna, převzato z [12]

3.5.2. Pásová sušárna

Dalším typem konvektivní sušárny je sušárna pásová. Jedná se o jeden (hovoříme o tunelové sušárně) nebo více dopravních pásů umístěných pod sebou, jenž se pohybují proti sobě. Jedná se o typ kontinuální sušky, kde je sušený materiál přiváděn na horní (případně jediný) pás ideálně tak, aby se vytvořila rovnoměrná, ne příliš tlustá vrstva. V případě uspořádání s více pásy materiál na konci pásu přepadá na níže umístěný, přičemž dojde k jeho promíchání. Z nejnižšího umístěného dopravníku materiál odchází z prostoru sušárny.

Nad pásy proudí sušící médium, jehož teplotu nad každým pásem můžeme, pokud je tomu konstrukce sušky uzpůsobena, regulovat stejně jako rychlost posuvu každého pásu. Výhodou tohoto typu sušky je kontinuální provoz a dlouhá doba sušení. Pokud využijeme perforované dopravníkové pásy, hovoříme o sušení z objemu [12], [13].



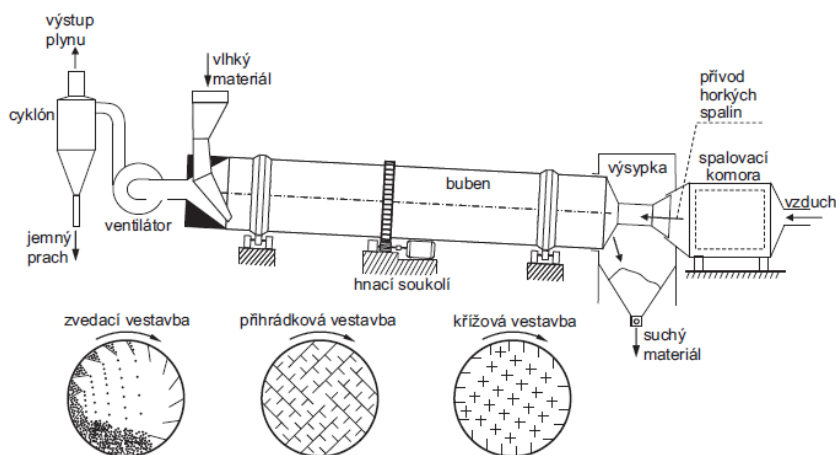
Obrázek 4: Pásová sušárna, převzato z [13]

3.5.3. Bubnová rotační sušárna

Jak již název napovídá, hlavním konstrukčním prvkem bubnové rotační sušárny je rotující válec (buben), který je mírně skloněný (do 6°) pro usnadnění posunu materiálu na konec sušky. Dále je buben většinou vybaven vnitřní vestavbou (viz obrázek 5), jenž umožňuje lepší promíchávání materiálu a v případě užití konvektivního otopu i zvětšení kontaktní plochy. Sušící médium (ohřátý vzduch, spaliny) může v bubnu proudit sou proudem či protiproudem.

Kromě konvektivního otopu můžeme u tohoto typu sušky využít i kontaktní otop – k sušení v tomto případě dochází kontaktem sušené látky s otopnou plochou či s trubkami vedenými uvnitř bubnu, v nichž proudí topná pára, která může i kondenzovat. Způsoby ohřevu lze kombinovat.

Bubnové sušárny jsou využity pro sušení polydisperzních, sypkých nebo pastovitých materiálů vyžadujících delší dobu sušení [12], [14].

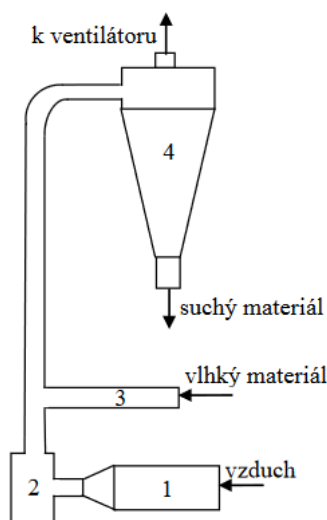


Obrázek 5: Bubnová sušárna s příklady možných vestaveb, převzato z [14]

3.5.4. Proudová sušárna

Proudová sušárna je typem kontinuální konvektivní sušárny pracující na principu sušení z objemu. Sušícím médiem je horký vzduch či spaliny, jenž plní současně i funkci přepravní. Sušený materiál, který u tohoto typu sušárny musí být zrnitý, nelepivý a neabrazivní, je přiváděn do proudu plynu, jehož rychlost musí být dostatečná pro zajištění úletu materiálu. Ten je pak dopravován dlouhým potrubím, v němž dochází k samotnému sušení. Větší kusy materiálu, které není schopen proud sušícího média unést, propadávají do mlýna pod dávkovačem, kde jsou následně rozemlety.

Na konci zařízení je umístěn cyklon, jenž by měl oddělit jemné částice z proudu plynu. Pro případ nedokonalého odloučení je za ním ještě zařazen filtr. Proudová sušárna může být provozována ve dvou stavech – v podtlaku, kdy nedochází k prášení ven ze sušárny, nebo v přetlaku.



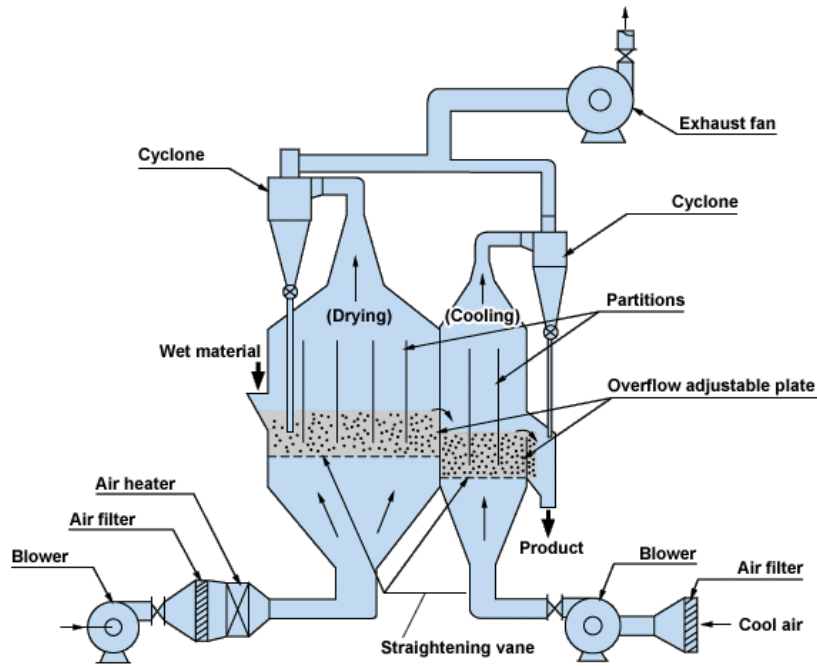
1 – ohřívač, 2 – mlýn, 3 – šnekový dávkovač, 4 - cyklon

Obrázek 6: Proudová sušárna, převzato z [12]

3.5.5. Fluidní sušárna

Stejně jako proudová sušárna, pracuje fluidní sušárna na principu kontinuálního sušení z objemu a jedná se o konvektivní sušení. Rozdílem však je rychlost proudění média – u fluidní sušárny nedochází k úletu materiálu, ale pouze k jeho vznosu. Je proto důležité, aby byl sušený materiál sypký a měl, pokud možno, stejnou velikost zrn, která jsou následně přiváděna na tzv. fluidní lože, jenž je zespod profukováno plynem. Tento perforovaný plech může být lehce skloněn, aby docházelo k posuvu sušeného materiálu, jenž se ve stavu fluidizace chová jako tekutina.

Dalším způsobem odvodu materiálu může být úlet dostatečně vysušených, a tudíž lehčích částic, z prostoru sušky, které jsou následně odděleny v cyklonu. Velkou výhodou fluidních sušáren je velký kontakt sušícího média s materiálem – ten je v podstatě kompletně obestoupen plynem – a dochází tak k velmi intenzivnímu přestupu tepla. [12], [15].

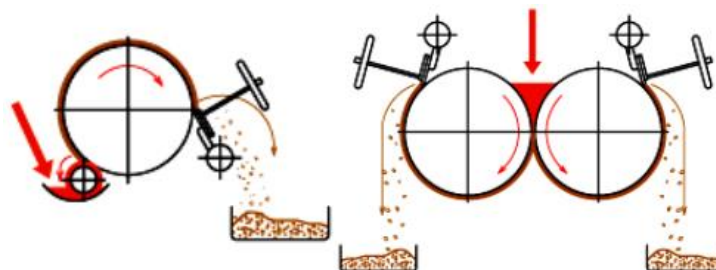


Obrázek 7: Fluidní sušárna, převzato z [15]

3.5.6. Válcová sušárna

Pro sušení těstovitých nebo lepkavých hustých kapalin či kašovitých suspenzí využíváme válcové sušárny. Jedná se o pomalu otáčející se válec, na který je ze zásobníku nanášena či nastříkována tenká vrstva sušeného materiálu a sušení tudíž probíhá kontinuálně. V průběhu jedné otočky válce dojde k vysušení materiálu a následně k jeho seškrábnutím mechanickou škrabkou.

Možné je také uspořádání se dvěma válci otáčejícími se v opačném smyslu, kdy je materiál nanášen do prostoru mezi válce. Vzhledem k tomu, že jsou válce vyhřívány zevnitř, jedná se o nepřímou formu sušení. Výhodou válcové sušárny je její energetická nenáročnost [12].

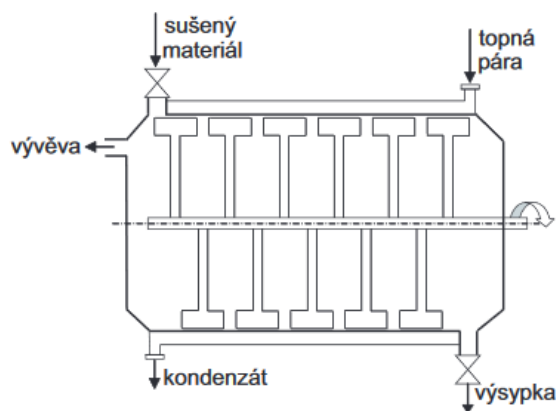


Obrázek 8: Válcové sušárny, převzato z [12]

3.5.7. Lopatková sušárna

Lopatková sušárna je nepohyblivý horizontální žlab s vyhříváním pláštěm. Uvnitř sušárny je umístěno míchadlo zajišťující promíchávání materiálu a jeho kontakt s teplosměnnou plochou vyhřívanou parou či elektricky. Tento typ je typickým příkladem vakuové sušárny. Její provoz je kampaňovitý a sušeným materiálem mohou být i hrudkovité, obtížně míchatelné materiály, škroby, barvy či práškové kovy.

Výhodou lopatkové sušárny je snížená teplota varu (viz graf 3) a tím menší energetická náročnost samotného zařízení. Zároveň je šetrnější k sušenému materiálu, jehož vlastnosti by mohly za vyšších teplot degradovat [12], [14].



Obrázek 9: Lopatková sušárna, převzato z [14]

3.6. Porovnání sušáren

Suška	Komorová	Pásová	Bubnová	Proudová	Fluidní	Válcová	Lopatková
Typ sušárny	konvektivní	konvektivní	konvektivní, [kontaktní]	konvektivní	konvektivní	kontaktní	kontaktní
Materiál	dřeviny, kusové ovoce a zelenina, maso, zrno	dřevní hmoty, kusové ovoce a zelenina, zrno	všechny druhy materiálů včetně lepivých a pastovitých	práškový, zrnitý, vláknitý	práškový, zrnitý, vláknitý	lepivé, husté kapaliny či suspenze, těstovité hmoty	zrna, granule, hrudkovité a obtížně míchatelné materiály
Kapacita [kg/h]		až 9 000	až 7 000	až 9 000	až 9 000	až 9 000	až 3 000
Provoz	kampaně	kontinuální	kontinuální	kontinuální	kontinuální	kontinuální	kampaně
Sušící médium	vzduch	vzduch, spaliny	vzduch, spaliny, [pára]	vzduch, spaliny	vzduch, spaliny	parovzdušná směs, [pára]	parovzdušná směs, [pára]
Teplota sušícího média [°C]	70-300	80-150	80-500	až 800	100-200	80-250	80-350
Tlak sušícího média	mírný přetlak, atm.	atm.	přetlak, atm.	přetlak	přetlak	atm., [podtlak, vakuum]	atm., [podtlak, vakuum]
Odpařovací výkon [kg/h H ₂ O]	1	10-100	10-100	4-300	až 90	7-30	10-15
Spotřeba energie [MJ/kg H ₂ O]	až 400	4,0-6,0	3,2-8,0	4,5-9,0	4,0-6,0	2,9-5,7	2,9-4,2

Tabulka 1: Porovnání typů sušáren

Jak je uvedeno v [16], více než 85% sušek využívaných v průmyslu jsou konvektivní sušky se sušícím médiem v podobně horkého vzduchu či spalin. Nejpoužívanějšími typy sušek pro biomasu jsou:

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

Obecně můžeme říci, že konvektivní sušky jsou méně energeticky účinnější než sušky kontaktní, jelikož značné množství energie ztrácíme v proudu odcházejících plynů. Výhodou kontaktních sušek je také fakt, že pára odcházející ze sušeného materiálu může být následně v dalších procesech využita. Typické hodnoty spotřeby energie jsou uvedeny v následující tabulce [16]:

Typ sušky	Spotřeba energie [MJ/kg odpařené vody]
Pásová suška	4,0 – 6,0
Rotační suška	4,6 – 9,2
Fluidní suška	4,0 – 6,0
Proudová suška	4,5 – 9,0
Bubnová suška	3,2 – 6,5

Tabulka 2: Spotřeba energie různých druhů sušek

4. Prostup tepla u kontaktních sušáren [17], [18]

Jak je naznačeno na konci předchozí kapitoly, energetická náročnost kontaktních sušáren je v porovnání s konvektivními nízká, což platí i o tepelném odporu. Další výhodou je i fakt, že při tomto typu sušení nevznikají více méně žádné prachové emise a pára odcházející z prostoru sušky je tak čistá. Zároveň je možné sušit za podtlaku, což zintenzivňuje proces sušení a umožňuje využití nízko potenciálního (odpadního) tepla. Vzhledem k přítomnosti lopatkové sušárny v hale ČVUT na Julisce, a tudíž možnému provedení odpovídajících experimentálních měření, se v této kapitole budu zabývat teorií prostupu tepla při kontaktním sušení, tj. vedením, právě u lopatkových sušáren. Při popisu vycházím z knih Handbook of Industrial Drying [17] a VDI Heat Atlas [18].

Základní rovnicí, jíž můžeme popsat prostup tepla z otápěného povrchu do sušeného materiálu je

$$Q = U \cdot A \cdot (T_1 - T_2). \quad (4.1)$$

Ve vztahu (4.1) Q představuje přenesené teplo, U je celkový součinitel prostupu tepla, A je teplosměnná plocha a teploty T_1 a T_2 odpovídají teplotě otápěného povrchu, resp. teplotě sušeného materiálu.

Celkový součinitel přestupu tepla U odpovídá součtu jednotlivých tepelných odporů, s nimiž se v systému setkáváme:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_h} + \frac{1}{h_w} + \frac{1}{h_f} + \frac{1}{h_m} + \frac{1}{h_v}, \quad (4.2)$$

kde $1/h_h$ je tepelný odpor mezi tepelným médiem a otápěnou stěnou, $1/h_w$ je odpor přes otápěnou stěnu, $1/h_f$ představuje odpor mezi plochou otápěné stěny a sušeným materiálem, $1/h_m$ je odpor ve vlastním sušeném materiálu a $1/h_v$ je odpor na povrchu materiálu, z něhož probíhá odpařování.

Ačkoliv v rovnici (4.2) vystupuje celkem pět odporů, významnou roli hrají pouze dva z nich – odpor ve vlastním materiálu $1/h_m$ a odpor mezi plochou otápěné stěny a sušeným materiálem $1/h_f$.

V roce 1984 formuloval profesor Ernst-Ulrich Schlünder vztahy použitelné pro odhad těchto dvou odporů jako

$$h_m = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{(\rho \cdot c_p \cdot \lambda)_{bed}}}{\sqrt{t}} \quad (4.3)$$

a

$$\frac{U}{h_f} = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \sqrt{\tau}} \quad (4.4)$$

kde ρ představuje hustotu sušeného materiálu a c a λ jsou jeho tepelnou kapacitou a tepelnou vodivostí. τ je bezrozměrná doba kontaktu nemíchané vrstvy sušeného materiálu s otápeňou stěnou a je rovna

$$\tau = \left(\frac{h_f^2}{(\rho \cdot c_p \cdot \lambda)_{bed}} \right) \cdot t. \quad (4.5)$$

Dosadíme-li $h_m = h_f$, získáme hodnotu kritické doby kontaktu t_c . Bude-li $\tau < t_c$, můžeme říci, že nezáleží, zda se jedná o míchanou či nemíchanou vrstvu materiálu a celkový součinitel prostupu tepla bude pro oba případy shodný.

$$t_c = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{(\rho \cdot c_p \cdot \lambda)_{bed}}{h_f^2} \quad (4.6)$$

Abychom získali obdobný vztah pro míchanou vrstvu, musíme nejdříve předpokládat existenci fiktivní časové periody t_R , během které budeme tuto vrstvu považovat za nemíchanou a prostup tepla v ní je tudíž řízen vztahem (4.4). Po uplynutí této doby t_R uvažujeme dokonalé promíchání vrstvy materiálu.

Tento předpoklad nám přináší oscilující součinitel okamžitého prostupu tepla a časový průměr těchto hodnot poskytuje celkový součinitel prostupu tepla v míchané vrstvě sušeného materiálu U_∞ .

Hodnotu časové periody t_R vypočítáme pomocí vztahu

$$t_R = N_{mix} \cdot t_{mix}, \quad (4.7)$$

kde N_{mix} je takzvané míchací číslo, jehož hodnota je zjištěna experimentálně a je závislá pouze na mechanických vlastnostech systému a na Froudeho čísle Fr . Číslo N_{mix} nabývá hodnot v rozmezí 2-25 a je nezávislé na povrchové teplotě otápeňého povrchu, provozním tlaku či na

vlhkosti sušeného materiálu. Vzhledem k tomu, že po uplynutí doby t_R uvažujeme dokonalé promíchání materiálu, můžeme pro zjednodušení říci, že se jedná o počet otáček míchadla potřebný pro toto ideální promíchání.

Pro hrubý odhad tohoto čísla Schünder a Mollekopf v roce 1984 doporučili následující vztah:

$$N_{mix} = C \cdot Fr^x \quad (4.8)$$

Froudeho číslo Fr vypočteme jako

$$Fr = \frac{(2 \cdot \pi \cdot n)^2 \cdot D}{2 \cdot g}, \quad (4.9)$$

kde je D průměr bubnu a n jsou otáčky míchadla.

Hodnoty C a x potřebné do rovnice (4.8) zjistíme z následující tabulky:

Typ sušárny	C	x
Disková sušárna	25	0,20
Bubnová rotační sušárna	16	0,20
Lopatková sušárna	9	0,05

Tabulka 3: Hodnoty C a x pro různé typy sušáren

Hodnotu časové konstanty míchadla t_{mix} v rovnici (4.7) můžeme uvažovat jako dobu potřebnou pro dokončení jedné otáčky míchadla.

Nyní můžeme v rovnici (4.4) nahradit bezrozměrnou dobu setrvání za

$$\tau_R = N_{therm} \cdot N_{mix}, \quad (4.10)$$

kde

$$N_{therm} = \frac{h_f^2 \cdot t_{mix}}{(\rho \cdot c_p \cdot \lambda)_{bed}}, \quad (4.11)$$

čímž získáváme vztah pro celkový součinitel prostupu tepla:

$$\frac{U_\infty}{h_f} = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \sqrt{N_{therm} \cdot N_{mix}}}. \quad (4.12)$$

Abychom určili hodnotu součinitele prostupu tepla h_f , využijeme následující zjednodušenou rovnici, jak ji v roce 1984 uvedl prof. Schlünder:

$$h_f = \phi_A \cdot h_{fp} + (1 - \phi_A) \cdot \frac{2 \cdot \frac{\lambda_G}{d}}{\sqrt{2} + \frac{2 \cdot l + 2 \cdot \delta}{d}} + h_{rad}, \quad (4.13)$$

kde h_{fp} je součinitel prostupu tepla jediné částice a je vypočten jako

$$h_{fp} = \frac{4 \cdot \lambda_G}{d} \cdot \left[\left(1 + \frac{2 \cdot l + 2 \cdot \delta}{d} \right) \cdot \ln \left(1 + \frac{d}{2 \cdot l + 2 \cdot \delta} \right) - 1 \right]. \quad (4.14)$$

λ_G je tepelná vodivost plynu, ϕ_A je faktor pokrytí povrchu, jenž nabývá hodnot kolem 0,8, d je průměr částic, δ představuje drsnost povrchu částic (ve většině případů ji pokládáme rovnu 0, výjimečně 1 μm).

Hodnota l je modifikovaná střední volná cesta molekul plynu a můžeme ji získat z následujícího vztahu:

$$l = 2 \cdot \Lambda \cdot \frac{2 - \gamma}{\gamma}, \quad (4.15)$$

kde Λ je střední volná cesta molekul plynu a γ je takzvaný koeficient přizpůsobení (v originále accommodation coefficient), jenž pro normální plyny při průměrných teplotách nabývá hodnot 0,8-1.

Střední volnou cestu molekul plynu Λ vypočteme následovně:

$$\Lambda = \frac{16}{5} \cdot \sqrt{\frac{R \cdot T}{2 \cdot \pi \cdot M}} \cdot \frac{\mu}{p}, \quad (4.16)$$

kde μ je dynamická viskozita plynu, p a T představují tlak a teplotu plynu, M je molekulární hmotnost molekul plynu a R je universální plynová konstanta.

Další hodnotou potřebnou pro dosazení do rovnice (4.13) je součinitel h_{rad} zohledňující vliv sálání a spočteme jej jako

$$h_{rad} = 4 \cdot C_{12} \cdot T_m^3. \quad (4.17)$$

Celkový radiační součinitel C_{12} vypočteme ze vztahu

$$C_{12} = \sigma \cdot \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{wall}} + \frac{1}{\varepsilon_{bed}} - 1}, \quad (4.18)$$

kde vystupuje Stefanova-Boltzmannova konstanta $\sigma = 5,64 \cdot 10^{-8}$ a ε_{wall} a ε_{bed} jsou emisivity otápané stěny a povrchu vrstvy sušeného materiálu. Výsledný vliv sálání je však vzhledem k nízkým teplotám sušení v sušárnách s nepřímým otopem nepatrný.

Pro stanovení hodnot tepelné vodivosti vrstvy buď monodisperzního nebo polydisperzního materiálu o kulových či nekulových částicích v rozmezí teplot 100-1500 K a tlaků 10^{-3} -100 baru můžeme využít následující Schlünderovy korelace:

$$\frac{\lambda_{bed}}{\lambda_G} = (1 - \sqrt{1 - \psi}) \cdot \left(\frac{\psi}{\psi - 1 + \frac{\lambda_G}{\lambda_D}} + \psi \cdot \frac{\lambda_R}{\lambda_G} \right) + \sqrt{1 - \psi} \cdot \left[\phi_K \cdot \frac{\lambda_S}{\lambda_G} + (1 - \phi_K) \cdot \frac{\lambda'_{bed}}{\lambda_G} \right] \quad (4.19)$$

a

$$\frac{\lambda'_{bed}}{\lambda_G} = \frac{2}{K} \cdot \left(\frac{B \cdot \left(\frac{\lambda_S}{\lambda_G} + \frac{\lambda_R}{\lambda_G} - 1 \right) \cdot \left(\frac{\lambda_G}{\lambda_D} \right) \cdot \left(\frac{\lambda_G}{\lambda_S} \right)}{K^2} \cdot \ln \frac{\left(\frac{\lambda_S}{\lambda_G} + \frac{\lambda_R}{\lambda_G} \right) \cdot \frac{\lambda_G}{\lambda_D}}{B \cdot \left[1 + \left(\frac{\lambda_G}{\lambda_D} - 1 \right) \cdot \left(\frac{\lambda_S}{\lambda_G} + \frac{\lambda_R}{\lambda_G} \right) \right]} + \frac{B + 1}{2 \cdot B} \left\{ \frac{\lambda_R}{\lambda_G} \cdot \frac{\lambda_G}{\lambda_D} - B \left[1 + \left(\frac{\lambda_G}{\lambda_D} - 1 \right) \cdot \frac{\lambda_R}{\lambda_G} \right] \right\} - \frac{B - 1}{K} \cdot \frac{\lambda_G}{\lambda_D} \right) \quad (4.20)$$

kde

$$K = \frac{\lambda_G}{\lambda_D} \left[1 + \left(\frac{\lambda_R}{\lambda_G} - B \cdot \frac{\lambda_D}{\lambda_G} \right) \cdot \frac{\lambda_G}{\lambda_S} \right] - B \cdot \left(\frac{\lambda_G}{\lambda_D} - 1 \right) \cdot \left(1 + \frac{\lambda_R}{\lambda_G} \cdot \frac{\lambda_G}{\lambda_S} \right), \quad (4.21)$$

$$B = C_{shape} \left(\frac{1 - \psi}{\psi} \right)^{0,9} \cdot f(\xi_r), \quad (4.22)$$

$$\frac{\lambda_R}{\lambda_G} = \frac{4 \cdot c_S}{2} \cdot T_m^3 \cdot \frac{x_R}{\lambda_G (\epsilon - 1)} \quad (4.23)$$

a

$$\frac{\lambda_G}{\lambda_D} = 1 + \frac{2 \cdot \Lambda}{x_D} \cdot \left(\frac{2}{\gamma} - 1 \right), \quad (4.24)$$

kde

$$x_R = R_{shape} \cdot d, \quad (4.25)$$

$$x_D = D_{shape} \cdot d. \quad (4.26)$$

V tomto případě d odpovídá ekvivalentnímu průměru částice a spočteme jej jako

$$d = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V}{\pi}}, \quad (4.27)$$

kde V je objem částice.

R_{shape} a D_{shape} jsou faktory tvaru pro intersticiální přenos energie radiací a molekulárním tokem.

Hodnoty relativních kontaktních ploch částic, ϕ_K a tři tvarové faktory C_{shape} , R_{shape} a D_{shape} musí být určeny experimentálně. Typickými hodnotami těchto parametrů pro kulové částice jsou $C_{shape} = 1,25$, $R_{shape} = 1$, $D_{shape} = 1$ a ϕ_K pro ocel je 0,0013.

Skládá-li se vrstva sušeného materiálu z částic z frakcí rozlišných hmotností Δz_i , je nutné hodnoty x_R a x_D vypočítat pomocí následujících rovnic:

$$\frac{1}{x_R} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta z_i}{R_{shape,i} \cdot d_i} \quad (4.28)$$

$$\frac{1}{x_D} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta z_i}{D_{shape,i} \cdot d_i} \quad (4.29)$$

Funkce rozložení velikosti částic $f(\xi_r)$ je vypočtena jako

$$f(\xi_r) = 1 + 3\xi_1, \quad (4.30)$$

kde

$$\xi_1 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta z_i}{d_i^2}}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{\Delta z_i}{d_i} \right)^2} - 1 \right]^{1/2} \quad (4.31)$$

představuje distribuční koeficient.

Vztah

$$d = \left(\sum \frac{\Delta z_i}{d_i} \right)^{-1} \quad (4.32)$$

pak udává ekvivalentní velikost polydispezního materiálu

Pro sušárny s míchanou vrstvou materiálu (lopatkové sušárny) v případě, že dojde k vypaření veškeré vody na povrchu částic, což platí pro nehydrofobické materiály, můžeme říci, že odpor proti vedení tepla a hmoty odpovídají již zmíněným kontaktnímu odporu a odporu vsázky. Se snižujícím se obsahem vlhkosti v sušeném materiálu, zvyšující se počet již vysušených částic

zabraňuje stále vlhkému materiálu v kontaktu s ohřivanou stěnou a dochází tak k dalšímu snižování rychlosti sušení.

V takovémto případě může být rychlost sušení $\dot{m}(X)$ předpovězena společně s teplotou sušeného materiálu T_b pomocí postupného výpočtu obsahu vody a teploty materiálu dle následujícího vztahu:

$$\dot{m}(X) = \frac{U_{wet}(T_w - T_s) \cdot e^{-\zeta^2}}{\lambda} \quad (4.33)$$

Pokles vlhkosti částic v průběhu kontaktu s otopnou plochou je odhadován jako

$$\Delta X = \frac{[\dot{m}(X) \cdot t_R \cdot A]}{M_{dry}} \quad (4.34)$$

a změna průměrné teploty materiálu je vypočtena z rovnice

$$\Delta T_b = \frac{\lambda}{c_{p,bed} + X \cdot c_{p,L}} \cdot \frac{1 - e^{-\zeta^2}}{e^{-\zeta^2}} \cdot \Delta X, \quad (4.35)$$

kde $c_{p,bed}$ a $c_{p,L}$ jsou tepelné kapacity sušeného materiálu, respektive vypařující se kapaliny, T_w odpovídá teplotu otápné kontaktní plochy, T_s je teplota vypařování a λ je měrné skupenské teplo varu.

Poměr celkového součinitele prostupu tepla vlhkého materiálu vůči součiniteli prostupu tepla na kontaktu otápné stěny se sušeným materiálem určíme jako

$$\frac{U_{wet}}{h_f} = \frac{1}{1 + \left(\frac{h_f}{U_{dry}} - 1\right) \cdot \operatorname{erf}(\zeta)} \quad (4.36)$$

kde

$$\sqrt{\pi} \cdot e^{\zeta^2} \cdot \left[1 + \left(\frac{h_f}{U_{dry}} - 1\right) \cdot \operatorname{erf}(\zeta)\right] = \left(\frac{h_f}{U_{dry}} - 1\right) \cdot \frac{1}{\xi} \quad (4.37)$$

a

$$\xi = \frac{X \cdot \lambda}{c_{p,bed} \cdot (T_w - T_b)} \quad (4.38)$$

Poměr celkového součinitele prostupu tepla suchého materiálu k součiniteli kontaktního prostupu tepla vypočteme pomocí vztahu

$$\frac{U_{dry}}{h_f} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\sqrt{\pi}}{2}\right) \cdot \sqrt{N_{therm} \cdot N_{mix}}} \quad (4.39)$$

Pro hygroskopické materiály, čímž krmivové granule použité při experimentech jsou, zohledňujeme vliv vody vázané v materiálu použitím efektivní tepelné kapacity hygroskopické vrstvy:

$$c_{p,bed,h} = c_{p,bed} + c_{p,L} \cdot X_h - \lambda \cdot \left(\frac{\partial X_h}{\partial T} \right)_p, \quad (4.40)$$

kde $\left(\frac{\partial X_h}{\partial T} \right)_p$ je sklon sorpční izobary a X_h je vázaná vlhkost.

V případě, že můžeme sorpční izobaru považovat za lineární, upravíme předchozí rovnici (4.40) do tvaru

$$c_{p,bed,h} = c_{p,bed} + c_{p,L} \cdot X_h - C_1 \cdot \lambda, \quad (4.41)$$

kde C_1 je konstanta a úbytek vázané vlhkosti pak můžeme vypočítat jako

$$\Delta X_h = C_1 \cdot \Delta T \quad (4.42)$$

a součet ΔX_f a ΔX_h pak dává celkový úbytek obsahu vody ve vrstvě sušeného materiálu a může být využit společně s rovnicí (4.34) pro výpočet celkové rychlosti sušení.

Jakmile získáme tuto rychlost sušení, je možné vypočítat velikost kontaktní plochy pomocí následujícího integrálu

$$I = \int_{X_{out}}^{X_{in}} \frac{dX}{\dot{m}(X)}. \quad (4.43)$$

U kampaňových sušáren díky tomuto integrálu získáme potřebnou kontaktní plochu A a potřebný čas setrvání sušeného materiálu t_{dry} jako

$$A \cdot t_{dry} = M_{dry} \cdot I. \quad (4.44)$$

4.1. Parametry ovlivňující sušení

Parametry ovlivňující sušení můžeme rozdělit na dvě hlavní skupiny. První z nich jsou parametry vázané na samotné sušicí zařízení a jeho provoz. V případě válcové sušky, jako jsme použili při experimentech, viz kapitola 5, jsou základními geometrickými parametry *průměr* a *délka*. Suška je také vybavena míchadlem, u nějž uvažujeme *otáčky*.

Dále se u sušky setkáváme s dalšími třemi provozními parametry, které však již můžeme pro jednotlivá měření ovlivňovat. Jsou jimi *teplota ohřevu*, *pracovní tlak* a pro kampaňovité sušárny i *zaplnění sušárny*. Teplota ohřevu nám udává, kolik energie dáváme do procesu sušení, pracovní tlak a jeho vliv je již popsán v kapitolách 3.2 a 3.3.1. respektive v rámci grafů 3 a 4. Zaplněním sušárny určujeme jednak kolik materiálu v jedné dávce budeme sušit,

ale také se mění kontaktní plocha mezi sušárnou a sušeným materiálem. Zároveň počítáme i s hodnotou *emisivity povrchu sušárny*.

Druhá skupina parametrů se týká samotného sušeného materiálu. Zde kromě případné volby samotného sušeného materiálu příliš možností nemáme. Můžeme v podstatě ovlivnit pouze teplotu materiálu, pokud bychom ho nějakým způsobem před vstupem do sušky předehtřivali.

Vzhledem k tomu, že v teoretických výpočtech nahrazujeme částice sušeného materiálu kulovými částicemi, potřebujeme určit či odhadnout *ekvivalentní průměr kulové částice*, k čemuž potřebujeme znát rozměry, resp. rozměry sušených částic. Druhým parametrem částice ovlivňující teoretický výpočet je *drsnota povrchu částice*, kterou však při výpočtech uvažujeme přibližně v rozmezí 0 až 1 μm .

Dále pracujeme se *sypnou hustotou*, *součinitelem tepelné vodivosti sušiny* a s její *měrnou tepelnou kapacitou*. Při výpočtu vlivu sálání také využíváme hodnotu *emisivity vrstvy materiálu*. *Pórovitost materiálu* potřebujeme při výpočtu tepelné vodivosti vrstvy materiálu.

5. Experimentální měření s kontaktní sušárnou

5.1. Popis měřících zařízení

Jak již bylo naznačeno v úvodu předchozí kapitoly, experimentální měření probíhala na kontaktní sušárně (viz obrázek 10) v prostorách laboratoří Ústavu energetiky ČVUT na Julisce. Tato sušárna je konstrukčně nejbližší lopatkovým sušárnám.

Jedná se o kampaňovitou sušárnu vybavenou vyjímatelným míchadlem. Délka válce je 1 metr a jeho průměr 0,256 metrů. Vytápění vnitřního prostoru sušárny je pomocí elektricky vyhřívaného pláště. Teplota otopu je nastavována a následně udržována pomocí PID regulátoru. Uvnitř sušky je umístěno 6 termočlánků, jenž měří teploty otápené plochy na více místech a teplotu páry odcházející ze sušárny. Samotný buben sušárny je z důvodů minimalizace ztrát do okolí vybaven tepelnou izolací.

V horní části je sušárna vybavena dvěma otvory – první z nich (na obrázku 10 levý) je určen pro plnění sušárny, druhý z nich slouží k odvodu vzniklé páry (ať už přímo či pomocí připojené vývěvy). Tyto otvory jsou vybaveny uzavíracími ventily. Na čelní straně sušárny je otvor s odnímatelným víkem. Tato část slouží k vyjmutí vsázky a čištění prostoru sušárny. Pohled dovnitř sušárny bez lopatkového míchadla tímto otvorem je na obrázku 11.

Sušárna, respektive platforma, na níž je umístěna, je vybavena tenzometrickou vahou pro zjištění přesné hmotnosti. Tato váha je společně s termočládky připojena k měřicí stanici, jenž měřená data zaznamenává a je možné je z ní exportovat.

Zjišťování obsahu vody v surovém a následně vysušeném materiálu bylo prováděno v laboratorní peci.

5.2. Průběh měření

Prvním krokem měření bylo nastavení požadované teploty na PID regulátoru. Následně se do sušky vložilo míchadlo, připevnilo se víko, a to se následně zakrylo izolací. Dále bylo nutné připravit materiál k sušení, kterým byly celkem tři materiály – krmné granule (obrázek 14), mulčovací kůra (obrázek 15) a dřevní štěpka (obrázky 12, 16, 17 a 18).

Množství materiálu bylo přibližně určeno pomocí odměrné nádoby s vyznačenými ryskami označujícími procentuální naplnění sušky. Přesné množství materiálu – jeho hmotnost – bylo určeno pomocí tenzometrické váhy. Zároveň jsme odebrali dostatečné množství reprezentativního vzorku pro vyhodnocení vlhkosti tohoto surového materiálu.

Po nahřátí sušárny na požadovanou teplotu jsme zapnuli elektrický pohon míchání a otvorem v horní části sušárny opatřeným plastovým trychtýřem, naplnili sušku odměřeným množstvím materiálu. V průběhu sušení jsme sledovali údaje na měřicí stanici a v pravidelných intervalech kontrolovali pokles hmotnosti, jenž značí úbytek vody v sušeném materiálu. Takto jsme pokračovali až do momentu, kdy jsme uznali za vhodné měření ukončit (uplynutí předem stanovené doby, dostatečný úbytek hmotnosti, výrazné zpomalení úbytku hmotnosti, ...).

Po ukončení měření bylo nutné co nejrychleji odizolovat a odmontovat víko, vysunout míchal a vyjmout veškerý sušený materiál. Zároveň bylo důležité odebrat další vzorek materiálu – tentokrát pro určení výstupní vlhkosti – a uzavřít jej tak, aby nedošlo ke zpětnému zvýšení vlhkosti. Vyjmutý materiál jsme pro účely kontroly hmotnostní bilance znovu zvážili.

Určení vstupní a výstupní hmotnosti sušeného materiálu probíhalo laboratorně. Nejdříve jsme pomocí přesných digitálních vah určili hmotnosti dostatečného množství keramických misek, jež jsme před vážením důkladně omyli a vysušili. Do každé z misek jsme poté vložili několik gramů sušeného materiálu (obrázek 12) a opět jsme je zvážili.

Následně jsme tyto vzorky vložili do laboratorní pece (obrázek 13) nahřáté na teplotu 110 °C na dobu minimálně 60 minut. Právě po této době můžeme vzorky považovat za zcela vysušené. Po jejich vyjmutí došlo znovu ke zvážení, abychom pomocí výpočtu mohli zjistit úbytek hmotnosti a určit tak vstupní, resp. výstupní vlhkost vzorku.

Přesný postup určení těchto vlhkostí je ukázán ve vzorovém vyhodnocení – kapitola 5.4.2.



Obrázek 10: Kontaktní sušárna ústavu energetiky ČVUT



Obrázek 11: Čelní pohled do prostoru sušárny s vyjmutým míchadlem



Obrázek 12: Keramické misky se vzorky (vlhká štěpka)



Obrázek 13: Laboratorní pec



Obrázek 14: Sušený materiál – krmné granule



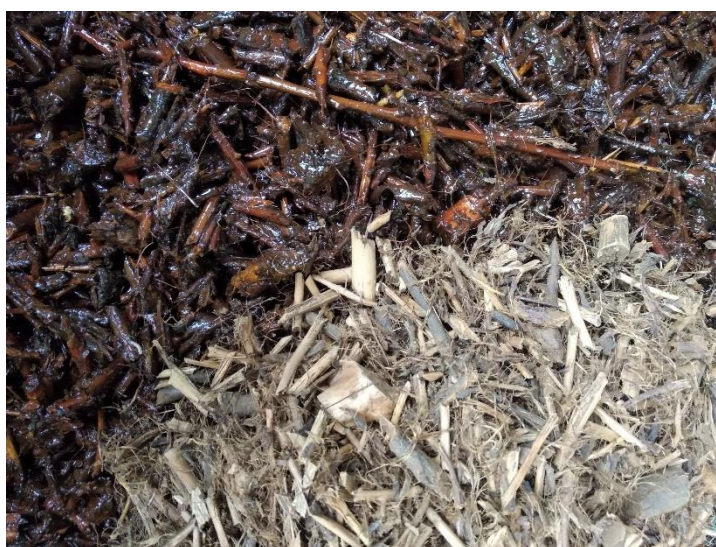
Obrázek 15: Sušený materiál – mulčovací kůra



Obrázek 16: Sušený materiál – dřevní štěpka, skladování venku



Obrázek 17: Dřevní štěpka, drcená



Obrázek 18: Dřevní štěpka, rozdíl mezi vlhkou (nahore) a suchou (dole)

5.3. Seznam a parametry měření

Pro jednotlivá měření byly měněny tři základní provozní parametry – teplota otopu sušárny, tlak uvnitř sušící komory a zaplnění vnitřního objemu sušárny. Hodnoty těchto parametrů jsou včetně sušeného materiálu uvedeny v následující tabulce.

Číslo měření	Datum měření	Sušený materiál	Teplota otopu [°C]	Tlak [bar]	Zaplnění [%]
I	20.12.2018	krmné granule	105	1	10
II	14.3.2019	krmné granule	90	0,2	15
III	21.10.2019	krmné granule	110	0,2	10
IV	9.1.2020	krmné granule	130	0,2	15
V	10.1.2020	krmné granule	150	0,2	15
VI	10.1.2020	krmné granule	170	0,2	15
VII	10.1.2020	krmné granule	150	0,2	15
VIII	10.1.2020	krmné granule	150	0,2	15
IX	16.1.2019	mulčovací kůra, drcená	130	1	10
X	16.1.2019	mulčovací kůra, drcená	130	1	20
XI	16.1.2019	mulčovací kůra, drcená	130	1	30
XII	17.1.2019	mulčovací kůra, drcená	115	1	10
XIII	17.1.2019	mulčovací kůra, drcená	130	1	10
XIV	17.1.2019	mulčovací kůra, drcená	145	1	10
XV	17.1.2019	mulčovací kůra	130	1	10
XVI	17.1.2019	mulčovací kůra, drcená	130	1	10
XVII	10.6.2020	dřevní štěpka	130	1	10
XVIII	10.6.2020	dřevní štěpka	130	1	20
XIX	10.6.2020	dřevní štěpka	145	1	10
XX	10.6.2020	dřevní štěpka	130	1	10
XXI	10.6.2020	dřevní štěpka, drcená	130	1	10

Tabulka 4: Seznam měření

Měření I a III probíhala v rámci předmětu Projekt I, respektive Měření v energetice. U všech měření byl přítomen vedoucí této práce Ing. Jan Havlík, Ph.D., u měření II, IV, V, VI, VII a VIII byl přítomen Ing. Michel Sabatini a u měření probíhajících 10.1.2020 byl přítomen doc. Ing. Tomáš Dlouhý, CSc. Data měření mulčovací kůry probíhající ve dnech 16.1.2019 a 17.1.2019 byla poskytnuta vedoucím práce Ing. Janem Havlíkem, Ph.D.. Tímto za ně ještě jednou děkuji. Dne 10.6.2020 při měření dřevní štěpky byli při měření přítomni Ing. Jan Havlík, Ph.D., Ing. Michel Sabatini a Bc. Miroslav Babor.

5.4. Vzorové vyhodnocení měření

V této kapitole, respektive v následujících podkapitolách, uvedu vzorové vyhodnocení měření XVII včetně uvedení naměřených hodnot. Pro vyhodnocení dalších měření bylo využito stejných postupů.

5.4.1. Rozměrové charakteristiky sušárny

V následující tabulce jsou základní rozměrové charakteristiky sušárny, jež jsou potřeba k vyhodnocení jednotlivých měření. Jednou z uvedených hodnot je i zaplnění sušícího bubnu, které se pro jednotlivá měření může lišit. Totéž platí i pro hodnotu objemu vsázky, který vychází právě ze zvoleného zaplnění.

Průměr bubnu	[m]	0,256
Délka bubnu	[m]	1
Vnitřní objem bubnu	[m ³]	0,0515
Zaplnění sušícího bubnu	[%]	10
Objem vsázky	[m ³]	0,00515
Poměr délka vztahená k průměru	[–]	3,9

Tabulka 5: Rozměrové charakteristiky sušárny

5.4.2. Měření obsahu vody ve vzorcích

V této kapitole je uveden způsob zápisu hodnot při měření obsahu vody ve vzorcích. Hodnoty „Hmotnost misky“, „Miska + vzorek před“ a „Miska + vzorek po“ jsou změřeny pomocí přesných digitálních vah. Hmotnost vzorku před určíme jako rozdíl hmotností „Miska + vzorek před“ a „Hmotnost misky“.

Obdobným způsobem určíme hmotnost sušiny, pouze odečteme „Hmotnost misky“ od hodnoty „Miska + vzorek po“. Obsah vody ve vzorku je následně určen pomocí následujícího vztahu:

$$\text{obsah vody} = \frac{\text{hmotnost vzorku před} - \text{hmotnost sušiny}}{\text{hmotnost vzorku před}} \quad (5.4.2.1)$$

Měření	Číslo misky	Hmotnost misky	Miska + vzorek před	Hmotnost vzorku před	Miska + vzorek po	Hmotnost sušiny	Obsah vody	Průměr
		[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[-]	[-]
1	2	40,200	56,387	16,187	45,845	5,645	0,651	0,621
2	A	41,801	60,448	18,647	49,346	7,545	0,595	
3	9	45,977	65,423	19,446	53,295	7,318	0,624	
4	11	39,303	61,147	21,871	47,459	8,156	0,627	
5	B	45,220	62,946	17,726	52,159	6,939	0,609	
1	7	46,005	51,930	5,925	50,541	4,536	0,234	0,227
2	2	39,262	48,316	9,054	46,188	6,926	0,235	
3	15	42,243	48,217	5,974	46,957	4,714	0,211	
4	6	47,611	55,402	7,791	53,623	6,012	0,228	

Tabulka 6: Měření obsahu vody ve vzorcích

5.4.3. Bilance materiálu

Známe-li hmotnost biomasy, kterou dáváme do sušky, a z analýzy vzorku (viz kapitola 5.4.2) víme, jakou má tento vzorek vstupní vlhkost, můžeme jednoduchými výpočtu určit čistou hmotnost sušiny a čistou hmotnost vody na vstupu do sušky. Obdobným způsobem můžeme určit i bilanci materiálu na výstupu, viz následující dvě tabulky.

Bilance materiálu na vstupu		
Biomasa + nádoba	[kg]	3,380
Nádoba	[kg]	1,040
Biomasa	[kg]	2,340
Vstupní vlhkost	[%]	62,1
Sušina	[kg]	0,887
Voda	[kg]	1,453

Tabulka 7: Bilance materiálu na vstupu

Bilance materiálu na výstupu		
Biomasa + nádoba	[kg]	2,190
Nádoba	[kg]	1,040
Biomasa	[kg]	1,150
Sušina	[kg]	0,887
Nevysušená voda	[kg]	0,263
Vysušená voda	[kg]	1,190
Dopočítaná vlhkost	[%]	22,9

Tabulka 8: Bilance materiálu na výstupu

Pro výpočet odchylky měření využijeme rozdíly ΔX_{lab} jako rozdíl laboratorně zjištěných vlhkostí a ΔX_{bil} jako rozdíl zjištěné vstupní vlhkosti a dopočítané vlhkosti z bilance materiálu:

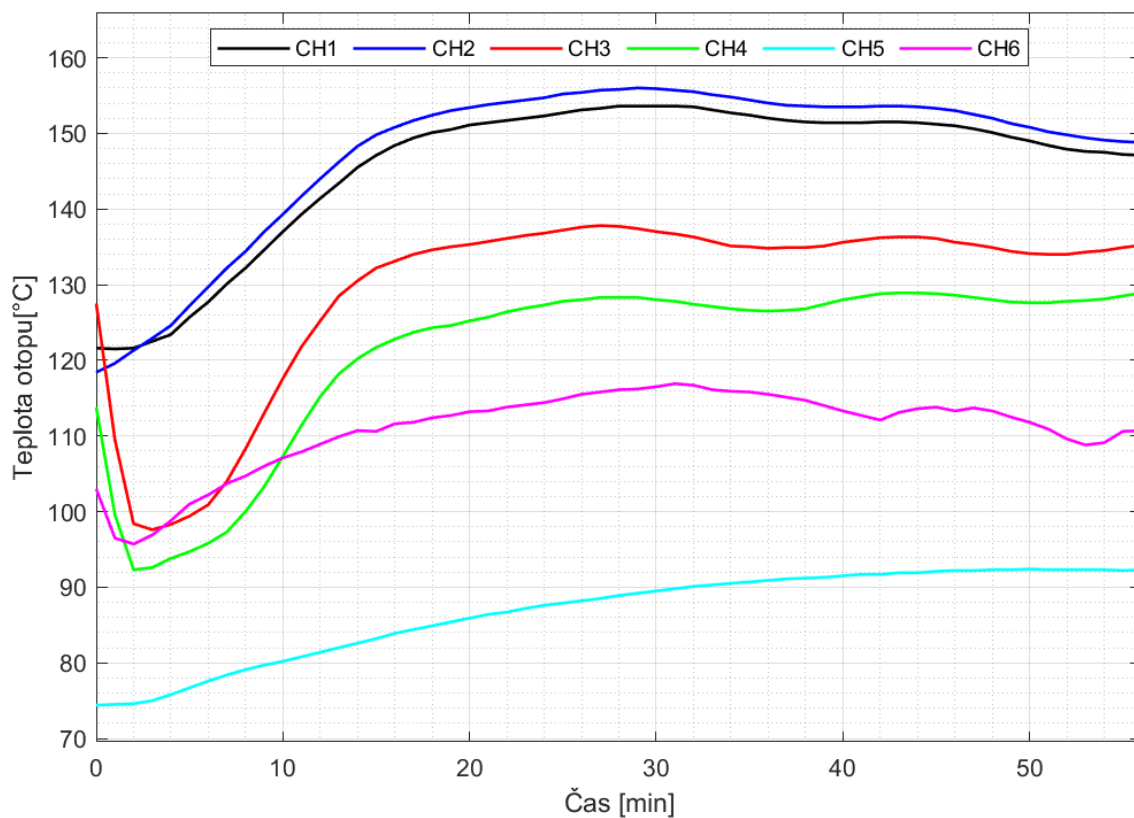
$$\text{odchylka měření} = \frac{\Delta X_{bil} - \Delta X_{lab}}{\Delta X_{lab}} \cdot 100 \quad (5.4.3.1)$$

$$\text{odchylka měření} = \frac{39,2 - 39,4}{39,4} \cdot 100 \doteq -0,5 \%$$

5.4.4. Průběh hmotnosti v čase a množství odebrané elektřiny

Pro měření XVII byly hodnoty měření zaznamenávány pomocí měřicí stanice, a to včetně odebrané elektřiny. Měřené hodnoty je možné sledovat v průběhu měření pomocí prostředí měřicího softwaru. Ukázka průběhu měřených hodnot (konkrétně teplot) je uvedena na grafu 6 a upravená ukázka výstupu z měřicí stanice je uvedena v následující tabulce (původně v prostředí MS Excel). Kanály 1 až 6 (CH1 až CH6) udávají hodnoty teplot měřenými termočlánky. Kanál 7 (CH7) udává výstup hmotnosti měřený tenzometrickou vahou. V posledním sloupci je uveden počet odebraných impulzů.

Teploty CH1 a CH2 jsou měřeny v horní části válce, teploty CH3 a CH4 ve spodní části, vždy na středu sušící komory a na jejím okraji. Teplota CH6 udává teplotu páry v odchozím hrdle. Na grafu průběhu teplot můžeme vidět, že na počátku měření dochází v určitých oblastech sušky k výraznému poklesu teploty. Jedná se o místa ve spodní části válce (CH3 a CH4), kde se nachází sušený materiál. Tento pokles je dán tím, že je v této oblasti velký odběr tepla. Regulace otopu sušárny je nastavena právě na termočlánek umístěný v místě největšího poklesu, aby došlo k opětovnému dohřátí na požadovanou teplotu. V horní části sušky se teplo odebírá pouze k přehřívání páry, není zde tedy tak velký odběr, a tudíž se zde teplota po sepnutí ohřevu narůstá.



Graf 6: Ukázka průběhu teplot během sušení

Čas	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	Pulse
[min]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[kg]	[–]
0	121,6	118,4	127,5	113,8	74,4	103	2,368	148
1	121,5	119,6	109,5	99,6	74,5	96,5	2,339	204
2	121,6	121,3	98,4	92,3	74,6	95,7	2,282	259
3	122,5	122,9	97,6	92,6	75	96,9	2,258	314
4	123,4	124,6	98,3	93,8	75,8	98,8	2,255	369
5	125,7	127,2	99,4	94,7	76,7	101	2,2	424
6	127,7	129,7	100,9	95,8	77,6	102,2	2,174	479
7	130,1	132,2	104	97,3	78,4	103,7	2,159	535
8	132,2	134,4	108,3	100	79,1	104,7	2,106	590
9	134,6	137	113	103,3	79,7	106	2,099	645
10	137	139,3	117,6	107,3	80,2	107,1	2,06	700
53	147,6	149,4	134,3	127,9	92,3	108,8	1,187	1551
54	147,5	149,1	134,5	128,1	92,3	109,1	1,165	1565
55	147,2	148,9	134,9	128,5	92,2	110,6	1,169	1577
56	147,1	148,8	135,2	128,9	92,3	110,7	1,143	1587

Tabulka 9: Ukázka záznamu hodnot z měřicí stanice

Hodnoty průběhu hmotnosti v čase v tabulce 9 využiji společně se znalostí hmotnosti sušiny při stanovení sušící křivky a hodnoty impulzů slouží k určení energetické náročnosti sušení dle následujícího poměru – 1 imp \approx 1 Wh.

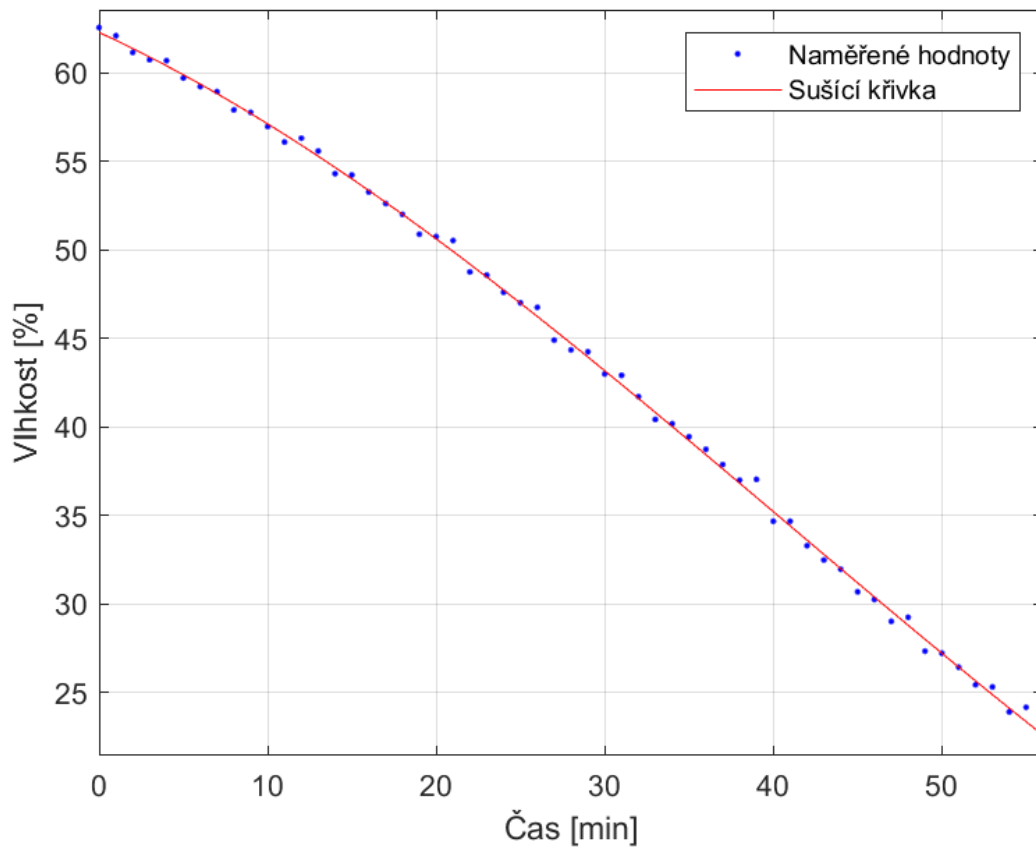
$$M_W^{t=10 \text{ minut}} = CH7^{t=10 \text{ minut}} - \text{hmotnost sušiny} = 2,060 - 0,887 = 1,173 \text{ [kg]}$$

$$W^{t=10 \text{ minut}} = \frac{M_W^{t=10 \text{ minut}} \cdot 100}{CH7^{t=10 \text{ minut}}} = \frac{1,173 \cdot 100}{2,060} \doteq 56,9 \text{ [%]}$$

$$\text{odebraná elektřina} = \frac{1587 - 148}{1000} \doteq 1,44 \text{ [kWh]}$$

5.4.5. Sušící křivka

Sušící křivka je závislost obsahu vody v materiálu W [%] na čase t [min] v průběhu procesu sušení.



Graf 7: Sušící křivka pro měření XVII

5.4.6. Určení měrných odpařivostí a energetické náročnosti

Měrná plošná odpařivost je množství vody odpařené z 1 m² otápěného povrchu sušárny za jednu hodinu sušení.

$$\dot{m}_S = \frac{\text{vysušená voda}}{\text{čas} \cdot \text{plocha bubnu}} \quad (5.4.6.1)$$

$$\dot{m}_S = \frac{1,190}{\frac{56}{60} \cdot 0,804} \doteq 1,59 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}^2} \right]$$

Měrná objemová odpařivost je množství vody odpařené z 1 m³ otápěného objemu sušárny za jednu hodinu sušení.

$$\dot{m}_V = \frac{\text{vysušená voda}}{\text{čas} \cdot \text{objem bubnu}} \quad (5.4.6.2)$$

$$\dot{m}_V = \frac{1,190}{\frac{56}{60} \cdot 0,0515} = 24,77 \left[\frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{m}^3} \right]$$

Energetická náročnost sušení je množství energie potřebné k odpaření 1 kg vody ze sušeného materiálu.

$$E_{el/kgW} = \frac{\text{odebraná elektřina}}{\text{odpařená voda}} \quad (5.4.6.3)$$

$$E_{el/kgW} = \frac{1,44 \cdot 3600}{1,190} \doteq 4\,360 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_W} \right]$$

5.4.7. Účinnost sušení

Pro určení účinnosti sušení musíme porovnat teoretickou energetickou náročnost sušení s reálnou spotřebou energie.

Teoretickou náročnost sušení vypočteme jako

$$Q_{celk_{teor}} = Q_{ohřev_{teor}} + Q_{vypař_{teor}} + \text{ztráty}, \quad (5.4.7.1)$$

kde

$$Q_{vypař_{teor}} = m_W \cdot \lambda \quad (5.4.7.2)$$

a

$$Q_{ohřev_{teor}} = m_W \cdot c_{p,L} \cdot \Delta t + m_S \cdot c_{p,M} \cdot \Delta t. \quad (5.4.7.3)$$

Teoretická potřeba tepla pro odpaření 1,19 kg vody je přibližně 3 100 kJ. Pro odpaření 1 kg vody tedy potřebujeme cca 2 600 kJ. Pro odpaření 1,19 kg vody jsme ve skutečnosti spotřebovali téměř 5 200 kJ, což pro odpaření jednoho kilogramu dává spotřebu zhruba 4 400 kJ.

Účinnost sušení v tomto případě určíme jako

$$\eta = \frac{Q_{teor}^{1\ kg}}{Q_{skut}^{1\ kg}} \cdot 100 = \frac{2\ 600}{4\ 400} \cdot 100 \doteq 59\ [\%]. \quad (5.4.7.4)$$

Z předcházejících hodnot můžeme vidět, že při tomto měření – materiál dřevní štěpka, teplota ohřevu 130 °C, zaplnění 10 % – dochází k poměrně vysokým ztrátám na úrovni 1 800 kJ na 1 kg odpařené vody, což činí celkovou ztrátu 41 %. U měření II až VIII je do celkové spotřeby nutné započítat i spotřebu vývěvy. Na druhou stranu s klesajícím tlakem klesá i výparné teplo.

Zjištěná ztráta neodpovídá rešersní části práce, kdy se předpokládá, že ztráty do okolí jsou u kontaktních sušáren relativně malé a účinnost sušení je tedy vysoká. Tuto ztrátu musíme pro případný návrh sušky vzít v úvahu v podobě opravného součinitele.

Výpočet energetické náročnosti a účinnosti je u některých měření (I, III, IX, X, XI, XII, XIII, XIV, XV, XVI) závislý na ručním odečtu spotřebované elektřiny. Z důvodu nedokonalého odečtu nevycházejí přesné energetické náročnosti a může se stát, že bylo odečteno množství odebrané elektřiny menší, než je teoreticky potřebné, a tudíž účinnost sušení vychází nepoměrně vyšší než u většiny měření, či dokonce vyšší než 100 %. Energetické náročnosti sušení a následné účinnosti pro měření, kde je tato chyba zjevná, nejsou vyhodnocena.

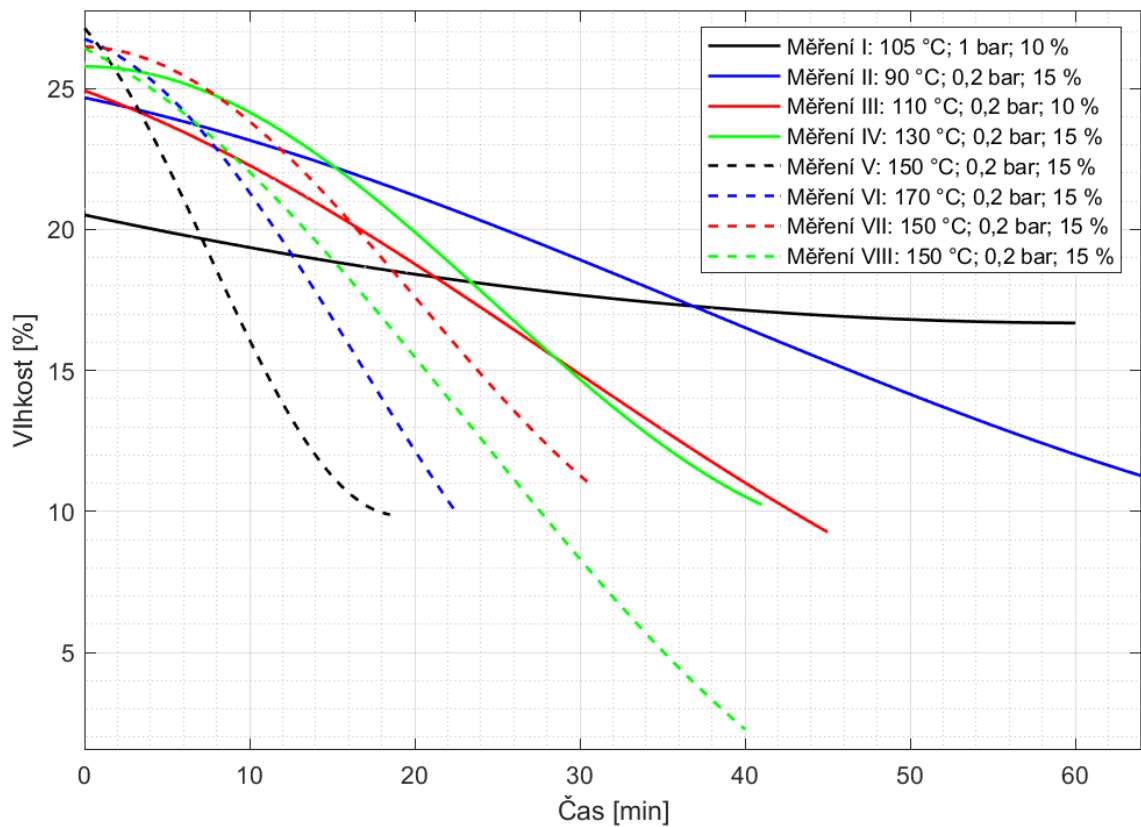
5.5. Souhrnné vyhodnocení měření

V následující tabulce je uvedeno vyhodnocení měrné plošné odpařivosti všech měření dle výše uvedeného vzorového vyhodnocení.

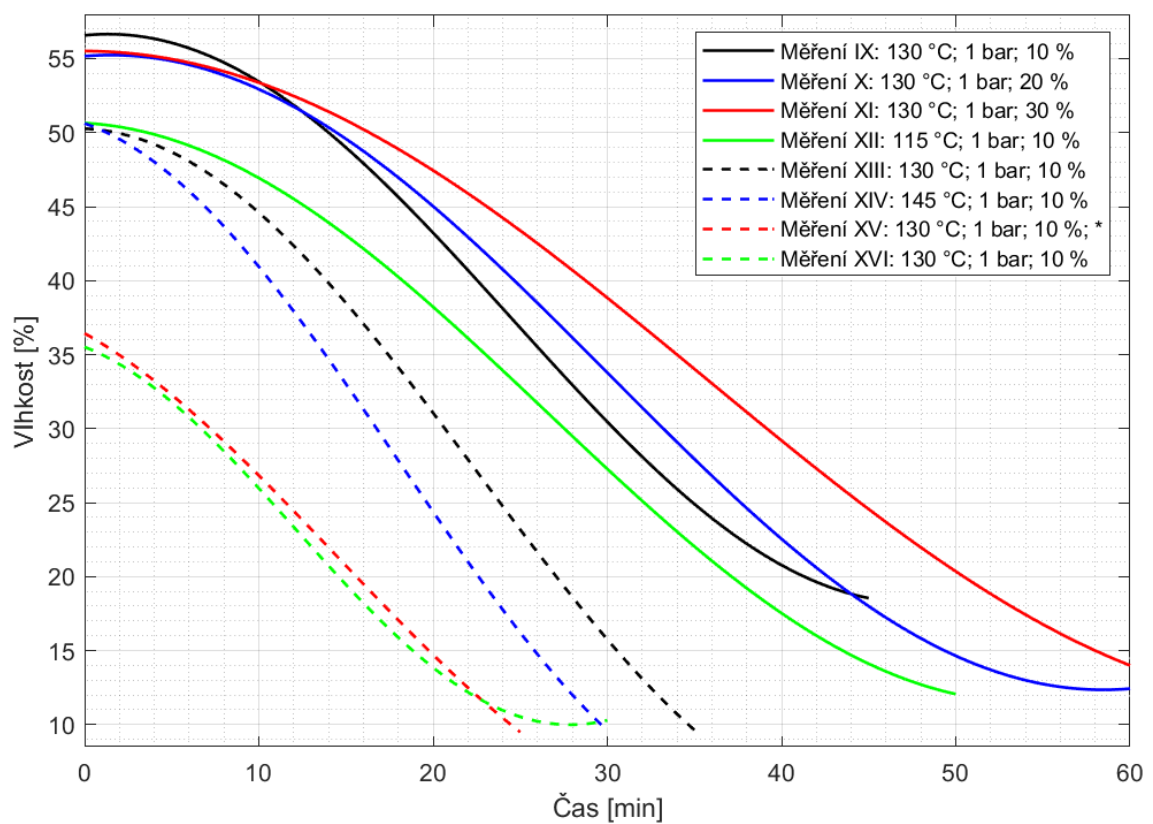
Číslo měření	Vstupní vlhkost [%]	Výstupní vlhkost		Odchylka měření [%]	Měrná plošná odpařivost $\left[\frac{kg_w}{h \cdot m^2}\right]$
		Analýza [%]	Bilance [%]		
I	20,6	11,4	14,4	-32,6	0,17
II	26,1	12,6	10,2	17,7	0,61
III	24,8	9,3	9,0	2,0	0,57
IV	25,8	5,5	5,8	-1,6	1,15
V	25,9	15,2	15,5	-2,7	1,47
VI	25,9	8,7	8,4	1,6	1,88
VII	25,9	9,3	9,5	-1,1	1,33
VIII	25,9	3,3	4,0	-3,1	1,27
IX	56,7	7,5	14,8	-14,7	1,65
X	56,7	2,8	10,4	-14,0	2,54
XI	56,7	3,1	12,2	-17,0	3,52
XII	50,5	5,7	10,7	-11,1	1,34
XIII	50,5	7,1	8,5	-3,3	1,97
XIV	50,5	3,8	6,8	-6,3	2,31
XV	37,3	11,5	7,5	15,6	1,45
XVI	37,3	3,5	2,3	3,7	1,42
XVII	62,1	22,7	22,9	-0,5	1,59
XVIII	62,1	31,4	31,8	-1,2	2,62
XIX	62,1	18,3	20,1	-4,0	2,09
XX	62,1	17,1	19,8	-6,0	1,54
XXI	61,2	2,1	12,8	-18,1	1,29

Tabulka 10: Souhrnné výsledky všech měření

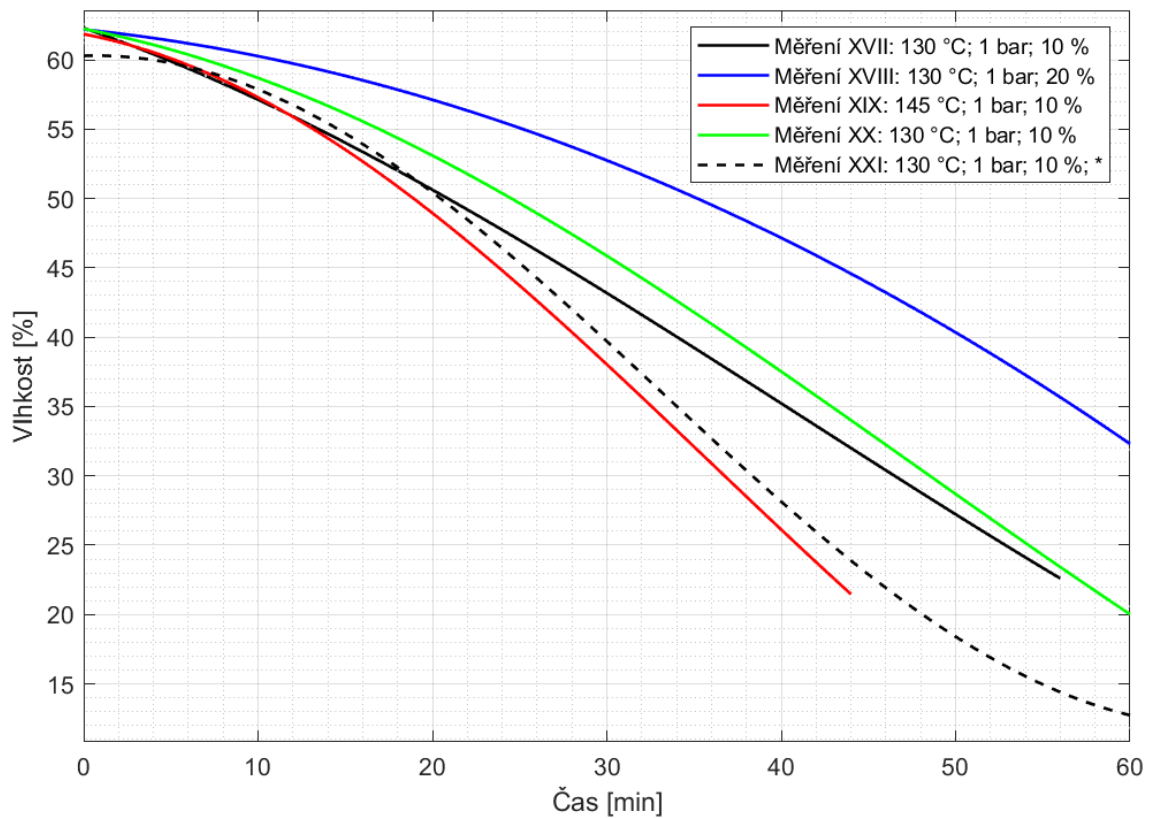
Detailnější vyhodnocení každého měření včetně sušící křivky je uvedeno v příloze A. Souhrnné sušící křivky pro každý materiál jsou uvedeny na následujících třech grafech (8 až 10). V legendě jsou u každého měření uvedeny vždy tři hodnoty v následujícím pořadí – teplota otopu, tlak uvnitř sušící komory a zaplnění sušky. Případný čtvrtý údaj v podobě hvězdičky značí změnu velikosti materiálu. Grafy 11, 12 a 13 zobrazují porovnání základních měřených parametrů během měření dřevní štěpky – zaplnění, otopu a velikosti částic.



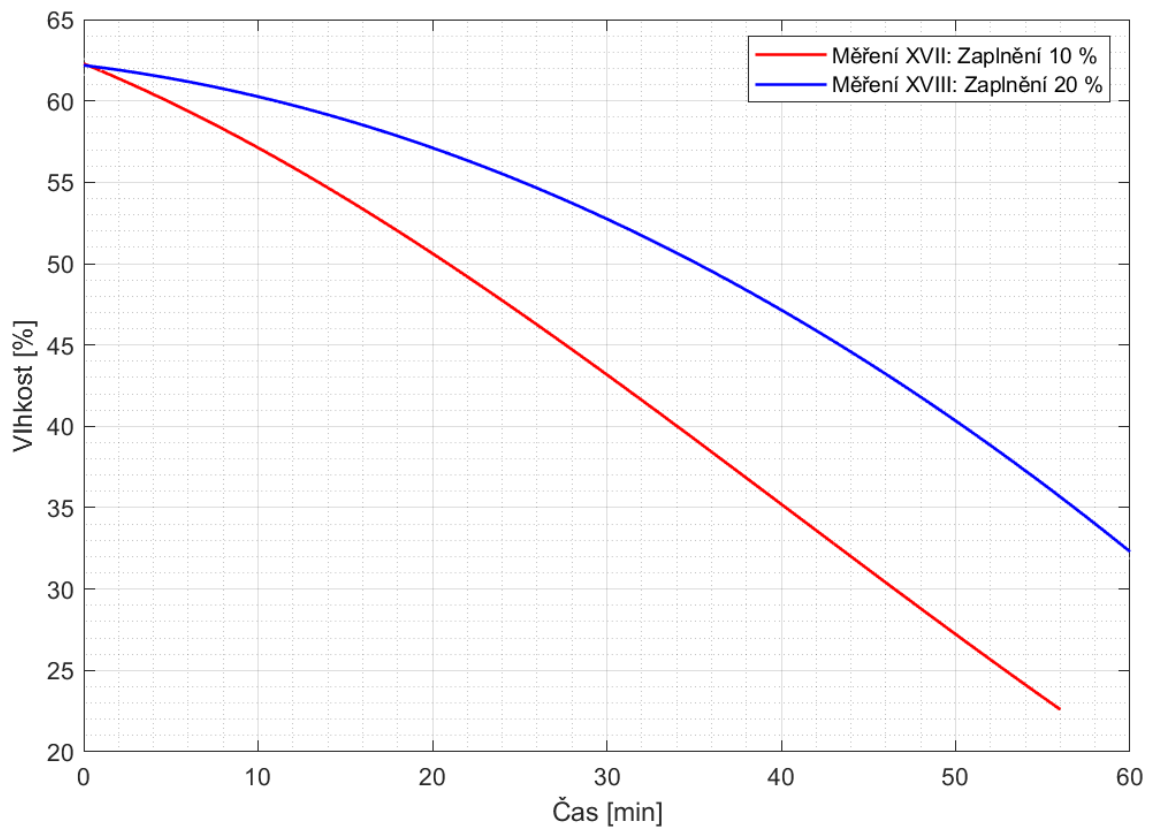
Graf 8: Sušící křivky pro materiál – krmné granule



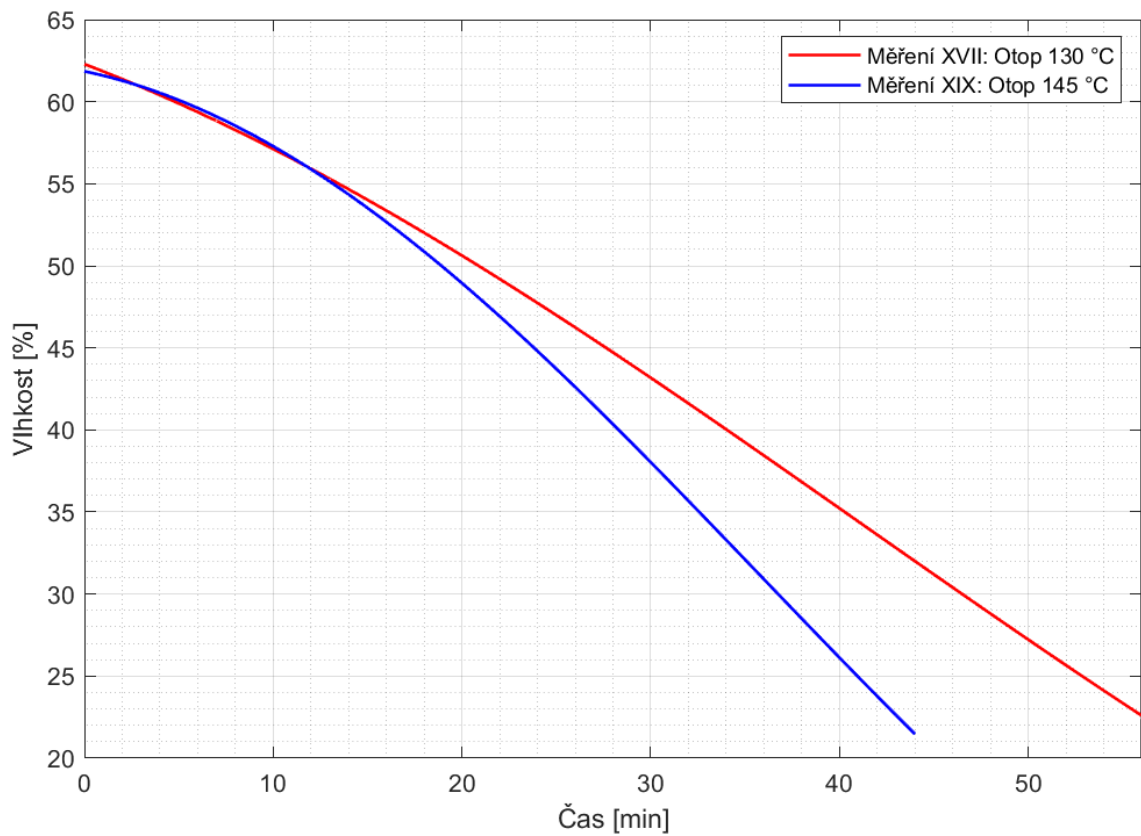
Graf 9: Sušící křivky pro materiál – mulčovací kůra



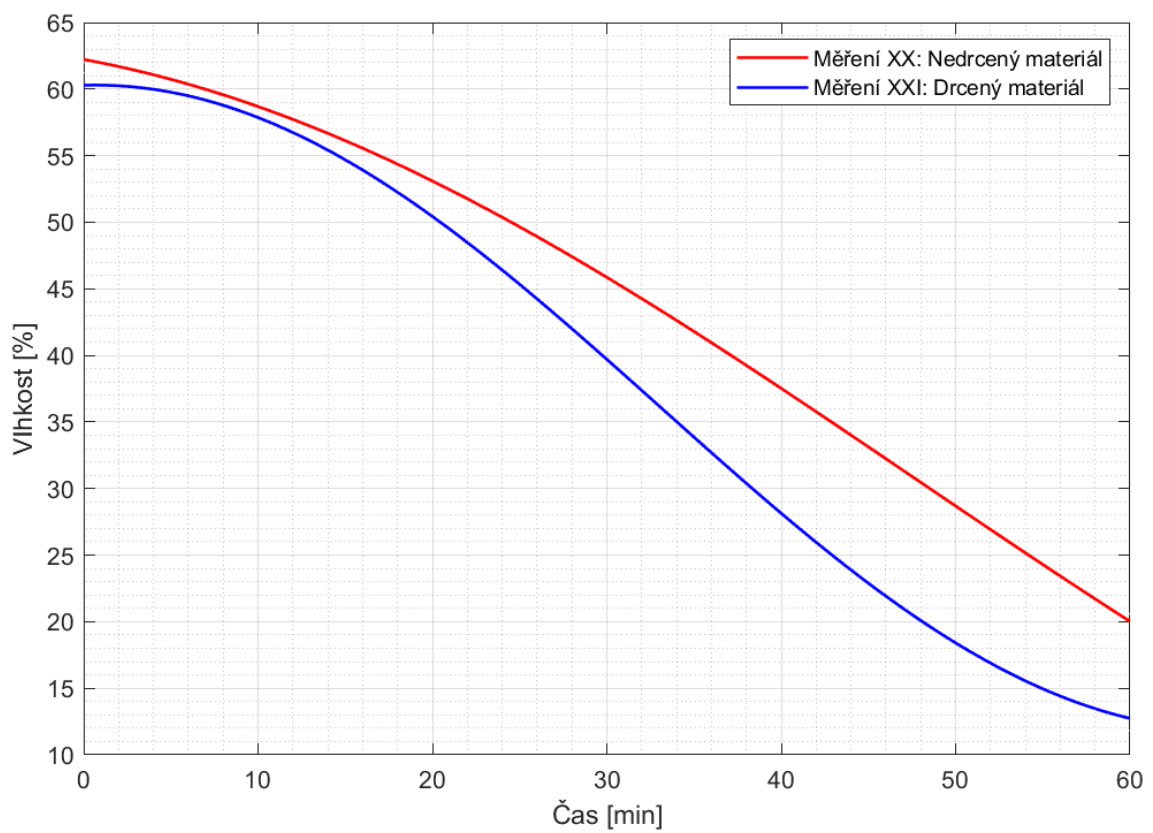
Graf 10: Sušící křivky pro materiál – dřevní štěpka



Graf 11: Porovnání vlivu zaplnění pro měření dřevní štěpky



Graf 12: Porovnání vlivu teploty otopu pro měření dřevní štěpky



Graf 13: Porovnání vlivu velikosti materiálu pro měření dřevní štěpky

Při pohledu na tabulku 10 vidíme, že ve většině případů byla výstupní vlhkost zjištěná analyticky menší, než je tomu u vlhkosti zjištěné z bilance materiálu. Tyto rozdíly mohou být způsobeny například vybráním nereprezentativního vzorku ať už vysušeného materiálu, tak i vstupního – chyba při určení vstupní vlhkosti ovlivní celkovou bilanci materiálu. S výjimkou měření I, kdy došlo zřejmě v důsledku špatného odvodu páry z prostoru sušky k její kondenzaci v odvodném potrubí a k následnému zpětnému zatečení vody do sušky, se však tyto odchylky pohybují v rozmezí maximálně $\pm 20\%$. U většiny zbývajících měření, konkrétně u 13, jsou tyto odchylky dokonce menší než 10 procent.

Většina zjištěných měrných odpařivostí se pohybuje v rozmezí od 1 do 2 $\text{kg}_w/\text{h.m}^2$. Nejnižší hodnoty měrné plošné odpařivosti – 0,17 $\text{kg}_w/\text{h.m}^2$ – je dosaženo u měření I, jehož vypovídající hodnota již byla okomentována výše. Naopak nejvyšší hodnoty měrné plošné odpařivosti bylo dosaženo při měření XI, kdy bylo zaplnění prostoru sušky 30 %. Obecně nejvyšších hodnot měrných plošných odpařivostí dosahujeme u měření s hodnotami zaplnění 20 a právě 30 %.

Vliv změny provozních parametrů sušení můžeme sledovat v grafech následujících tabulku. První tři grafy zobrazují všechny sušící křivky pro daný materiál – krmné granule (graf 8), mulčovací kůra (graf 9) a dřevní štěpka (graf 10). Lepší přehled o vlivu získáme z grafů srovnávající pouze dvě měření se změněným parametrem.

Na grafu 11 zobrazujícím sušící křivky měření XVII a XVIII můžeme vidět, že doba sušení se se zvyšujícím se zaplněním prodlužuje. Podíváme-li se na měrné plošné odpařivosti – 1,59 pro měření XVII a 2,62 pro měření XVIII, vidíme, že se zvyšují také, a to v přibližně stejném poměru. Vysušení na přibližně 35 % dosáhneme u 10% zaplnění za přibližně 40 minut, u dvojnásobného zaplnění za dobu 56 minut, což je přesně o 40 % více. Zároveň je měrná plošná odpařivost 10% zaplnění o 39 % menší, než je tomu u zaplnění 20 %.

Teplota otopu a její vliv na sušení je zkoumána na grafu 12 pro měření XVII a XIX. Zde vidíme, že stejného vysušení přibližně na úroveň 23 % pro otop 145 °C dosáhneme přibližně o 12 minut dříve než při nastavení otopu na hodnotu 130 °C, což odpovídá zhruba o 21 % rychlejšímu sušení. Graf 13 udává rozdíl sušících křivek pro stejné nastavení podmínek měření, ale pro dvě různé velikosti téhož materiálu. U sušící křivky měření XX můžeme vidět, že po 60 minutách došlo v podstatě k optimálnímu vysušení materiálu na 20 % obsahu vody. Pro drcený materiál – měření XXI – za stejnou dobu již však došlo k přesušení materiálu na téměř 13 %.

Podíváme-li se pro tato měření na měrné odpařivosti, zjistíme, že pro drcený materiál vychází odpařivost menší (1,29) než je tomu u materiálu nedrceného (1,54). Tento zdánlivý rozpor je dán tím, že je měrná plošná odpařivost je počítána pro celý průběh sušení a při pohledu na sušící křivku měření XXI vidíme, že na jejím konci dochází k jejímu mírnému vyrovnání. Více vypovídající je sklon sušící křivky v oblasti přibližně lineárního průběhu – zhruba do 20 % vlhkosti materiálu – kde můžeme jasně vidět, že sklon křivky pro drcený materiál je větší. S obdobným ovlivněním hodnoty měrné plošné odpařivosti se můžeme setkat i u dalších měření, kde docházelo k výraznějšímu přesušování materiálu pod 20 %. Důkladnější vyhodnocení všech 21 jednotlivých měření včetně grafického vynesení sušících křivek je uvedeno v příloze A.

6. Srovnání teoretických a experimentálních výsledků sušení

Na základě teorie popsané v kapitole 4 a pomocí vzorového příkladu v [18] byl v programu MATLAB vytvořen výpočtový model. Vstupními hodnotami jsou: geometrické parametry sušícího zařízení, teplota otopu, tlak uvnitř sušící komory, zaplnění sušící komory, vstupní a výstupní vlhkosti materiálu, teplota materiálu na vstupu, hmotnost sušiny a hmotnosti na začátku a na konci měření.

Dále do výpočtu vstupují parametry týkající se sušeného materiálu – jeho rozměry, pórovitost apod., jenž bylo potřeba určit či odhadnout a jsou uvedeny v kapitole 6.1. Součástí vstupu jsou i hodnoty koeficientů, jenž jsou popsány v kapitole 4., přičemž ty, které jsou ve výpočtech měněny pro jednotlivé materiály jsou uvedeny v téže tabulce, jako parametry materiálů. Zároveň je potřeba znát vlastnosti sušícího prostředí – molární hmotnost, měrnou tepelnou kapacitu, tepelnou vodivost a dynamickou viskozitu. Vlastnosti vody a vodní páry byly zjištěny pomocí doplňku XSteam a vlastnosti vzduchu pomocí doplňku CoolProp.

Výstupem výpočtu je sušící křivka, respektive rovnice křivky popisující její průběh. Ze znalosti požadované výstupní vlhkosti je možné přesně zjistit teoretickou dobu sušení. Pomocí rozdílu hmotností na vstupu a výstupu dostáváme množství odpařené vody a měrnou plošnou odpařivost pak spočteme stejně jako v případě vzorového vyhodnocení experimentálních měření (rovnice 5.4.6.1)

6.1. Parametry používané při teoretických výpočtech

V následující tabulce jsou uvedeny parametry a vlastnosti materiálu využívané při výpočtech v programu MATLAB. Krmné granule jsou ve výpočtu považovány za monodisperzní materiál. Mulčovací kůra a dřevní štěpka, jako polydisperzní materiály, jsou popsány pomocí třech velikostních frakcí a jejich procentuálním zastoupením na hmotnostním složení směsi. Rozměry tří velikostních frakcí byly změřeny v průběhu měření, procentuální zastoupení těchto frakcí bylo odhadnuto. Hodnoty tepelné vodivosti materiálu pro mulčovací kůru a dřevní štěpku jsou závislé na hustotě, vlhkosti, a pórovitosti materiálu a jsou vypočteny pomocí rovnice uvedené v [19].

		Krmné granule	Mulčovací kůra	Dřevní štěpka
Rozměry materiálu	[mm]	délka 15 průměr 7	15x10x3 (40 %)	délka 40; průměr 3 (5 %)
			30x15x3 (50 %)	délka 24; průměr 6 (55 %)
			45x15x3(10 %)	délka 24; průměr 12 (40 %)
Pórovitost materiálu	[%]	22,7	15	35
Drsnost povrchu	[μm]	1	1	1
Emisivita	[–]	0,85	0,85	0,85
Hustota sušiny	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	850	500	750
Měrná tepelná kapacita	$\left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]$	2 000	1 800	1 800
Tepelná vodivost materiálu	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}\right]$	0,10	$f(\rho, X, \psi)$	$f(\rho, X, \psi)$
Sypná hustota	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	312	350	486
Akomodační koeficient	[–]	0,75	0,9	0,6
Faktor pokrytí povrchu	[–]	0,8	0,9	0,6

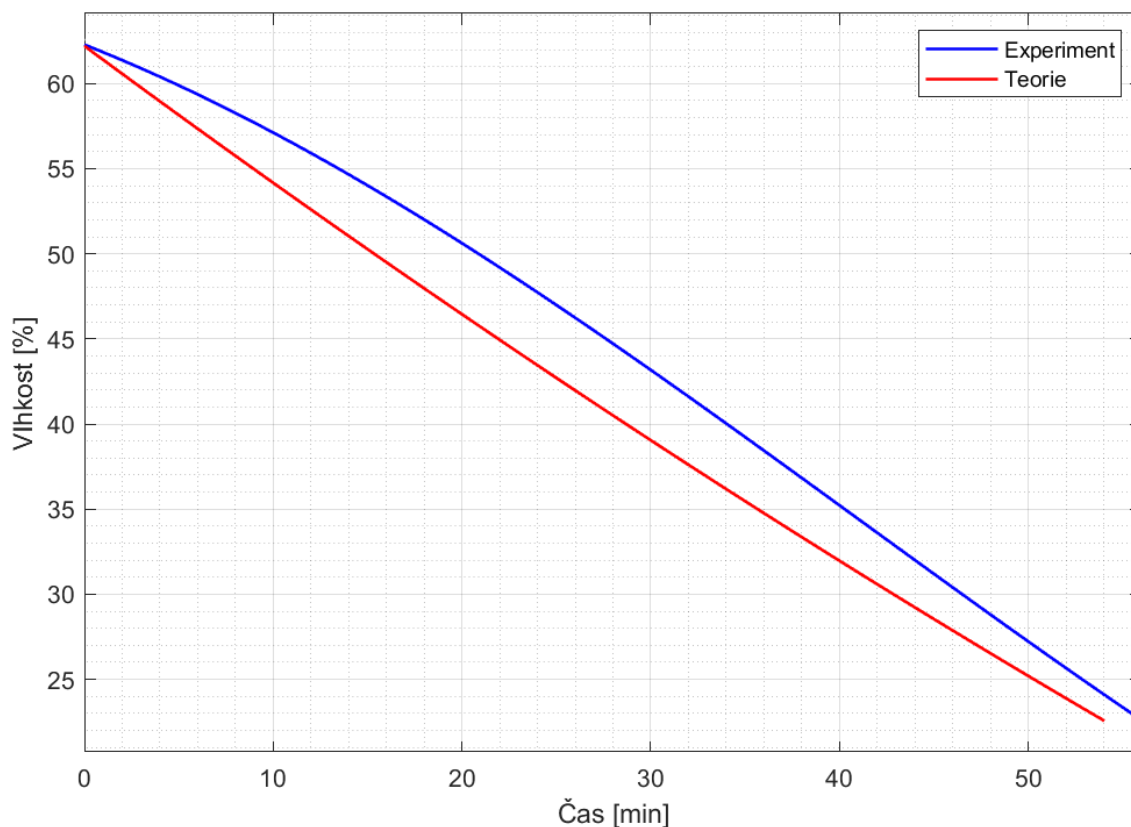
Tabulka 11: Určené / odhadované parametry materiálu

6.2. Srovnání výsledků experimentů a teorie

V této kapitole je uvedeno srovnání výsledků experimentů a teorie. Jako první je zde uvedena tabulka srovnávající experimentálně zjištěné hodnoty měrných plošných odpařivostí a dob sušení s těmi teoreticky vypočtenými. Následně je v grafu uvedeno srovnání sušících křivek pro měření XVII, jelikož toto měření bylo již vyhodnoceno v rámci vzorového vyhodnocení experimentálních měření včetně uvedení sušící křivky.

Číslo sušení	Hodnoty z experimentů		Teoretické hodnoty		Odchylka
	Měrná plošná odpařivost	Doba sušení	Měrná plošná odpařivost	Doba sušení	
	$\left[\frac{kg}{h \cdot m^2} \right]$	[min]	$\left[\frac{kg}{h \cdot m^2} \right]$	[min]	
I	0,17	60,0	0,43	24,3	60,5
II	0,61	64,0	0,66	58,9	7,6
III	0,57	45,0	0,87	29,5	34,5
IV	1,15	41,0	1,28	36,7	10,2
V	1,47	18,5	1,95	13,9	24,6
VI	1,88	22,5	2,00	21,1	6,0
VII	1,33	30,5	1,73	23,5	23,1
VIII	1,27	40,0	1,51	33,6	15,9
IX	1,65	45,0	2,03	36,5	18,7
X	2,54	60,0	2,50	60,9	-1,6
XI	3,52	60,0	3,55	59,5	-0,8
XII	1,34	50,0	1,05	63,7	-27,6
XIII	1,97	35,0	1,68	41,0	-17,3
XIV	2,31	30,0	2,81	24,7	17,8
XV	1,45	25,0	1,15	31,4	-26,1
XVI	1,42	30,0	1,29	32,9	-10,1
XVII	1,59	60,0	1,74	51,1	8,6
XVIII	2,62	60,0	2,71	58,1	3,3
XIX	2,09	45,0	2,05	44,7	-2,0
XX	1,54	60,0	1,64	56,3	6,1
XXI	1,29	60,0	1,42	54,4	9,2

Tabulka 12: Porovnání výsledků experimentálních měření a teoretických výpočtů



Graf 14: Srovnání sušících křivek získaných z experimentu a z teorie pro měření XVII

Odhlédneme-li od nevypovídajícího měření I, můžeme u všech měření s výjimkou dvou vidět, že při porovnání experimentálních a teoretických hodnot dochází k odchýlkám v rozmezí přibližně $\pm 25\%$. Tyto rozdíly mohou být dány několika důvody. První z nich jsem již uvedl v závěru předchozí kapitoly – hodnoty měrných plošných odpařivostí z experimentálních jsou počítány z celého průběhu sušení, který není, jak můžeme vidět na některých sušících křivkách, vždy rovnoměrný, čímž je výsledná hodnota odpařivostí ovlivněna. U teoretických výpočtů je oproti tomu průběh sušení považován po celou dobu rovnoměrný. Srovnání těchto dvou sušících křivek je vykresleno na grafu 14.

Dále jsou odchylky dány míchadlem – u teoretického výpočtu je kontaktní plocha mezi suškou a materiálem vyjádřena jako délka oblouku kruhové úseče, kdežto reálně je u provedených experimentů tato plocha o něco větší. Je to dáno jednak samotnou přítomností míchadla v prostoru sušky, které zvětšuje zaplněný objem, a pak také pohybem míchala, které rozhrnuje materiál, čímž dostáváme o něco vyšší ‚hladinu‘ než by tomu bylo bez míchání. V neposlední řadě jsou rozdíly dány přesností popisu jednotlivých materiálů. Některé vlastnosti, jako například velikost materiálu a jeho sypná hustota, bylo možné alespoň přibližně určit v průběhu experimentálních měření. Můžeme vidět, že pro výpočet měření dřevní štěpky došlo pravděpodobně k velmi dobrému popisu sušeného materiálu, jelikož odchylky experimentálně zjištěných a teoreticky vypočtených hodnot nedosahují ani 10 %.

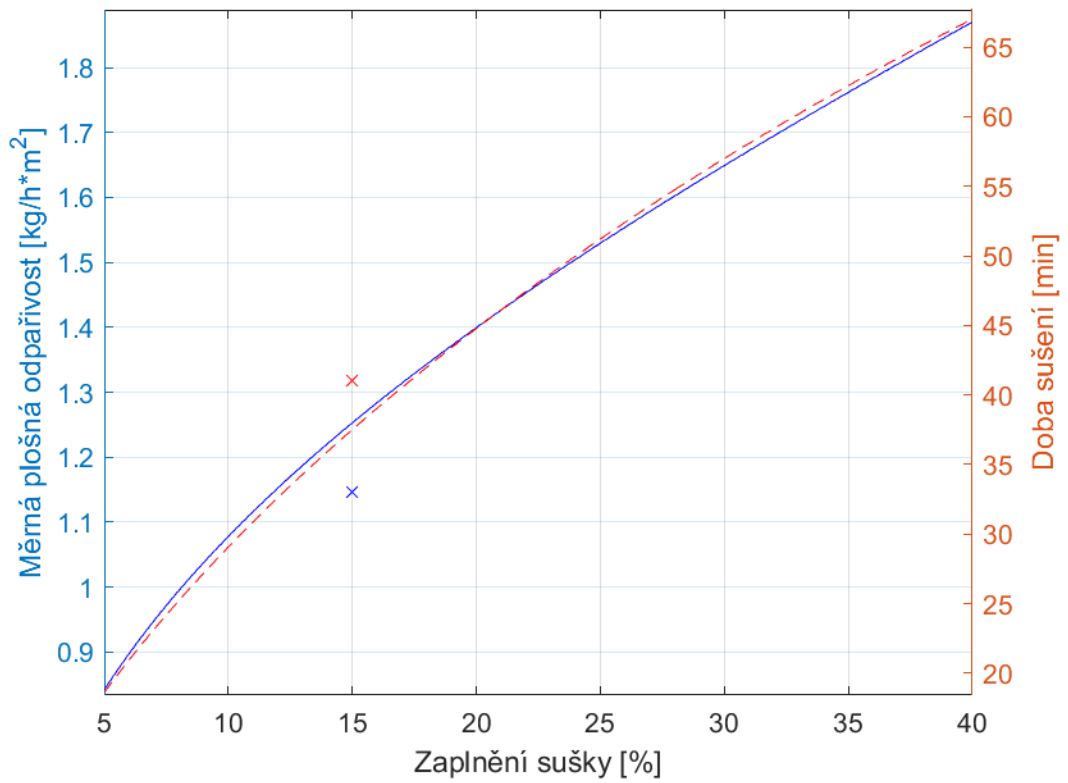
7. Vliv parametrů sušení či materiálu na průběh sušení

V této kapitole je, podobně jako v závěru kapitoly 5.5 na grafech 10 až 12, zkoumán vliv změny určitých parametrů na sušení, a to pomocí vytvořeného výpočtového modelu, jehož výsledky byly experimentálně ověřeny v předchozí kapitole. Pro potřeby této kapitoly bylo náhodně vybráno měření IV, jenž bylo upraveno tak, aby byly iteračním způsobem vypočítány měrné plošné odpařivosti a předpokládané doby sušení pro zvolené rozmezí právě zkoumaného parametru. Iterace byly provedeny pomocí for-cyklu a bylo jich pro každý parametr vypočteno 1000 – například pro zjištění vlivu teploty otopu byly provedeny výpočty s krokem iterace 0,13 °C mezi hodnotami 70 °C a 200 °C.

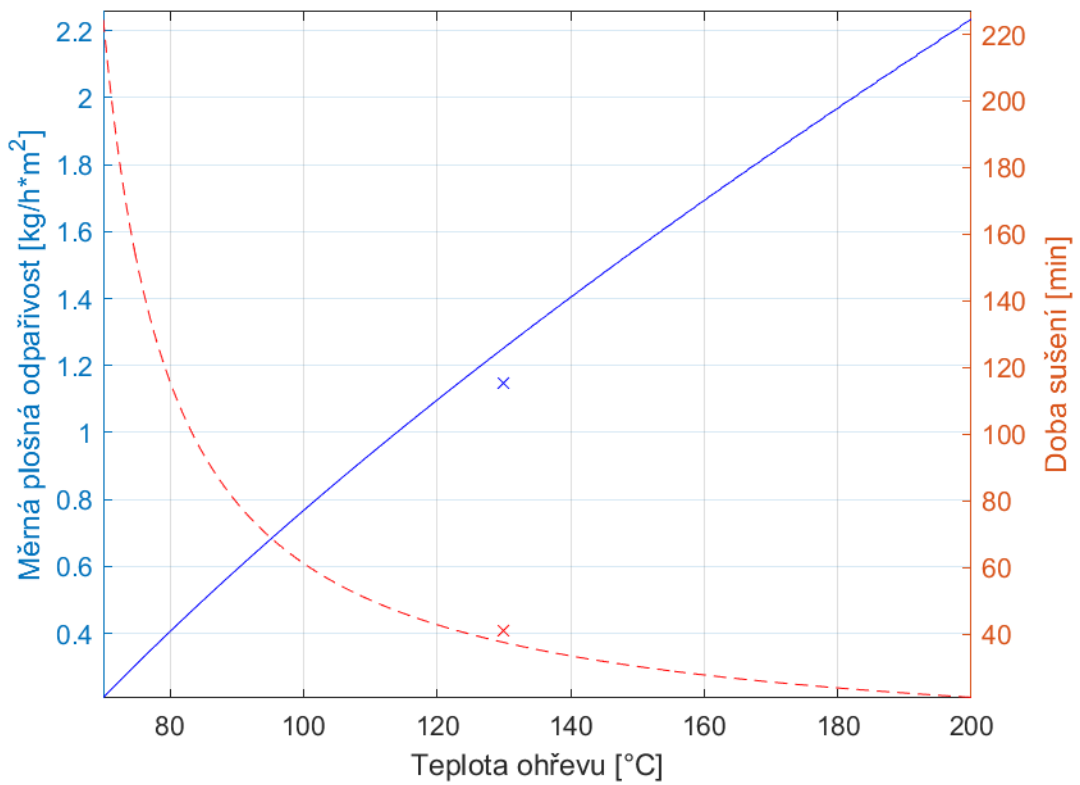
Výstupem jsou křivky, kde se na vodorovné nachází hodnoty zkoumaného parametru, na levé svislé ose (modře) hodnoty měrných plošných odpařivosti a na pravé ose (červeně) předpokládané doby sušení. Zároveň jsou vždy v grafu vyznačeny dva body – měrná plošná odpařivost a doba sušení získané z experimentálního měření v odpovídajících barvách.

Grafy 15 až 21 se týkají měření IV pro materiál krmné granule. Parametry použité při původním výpočtu, pro něž jsou v grafech vyznačeny body, jsou zaplnění sušky 15 %, teplota ohřevu 130 °C, ekvivalentní velikost materiálu 11,2 mm, sypná hustota materiálu 312 kg/m³, tepelná vodivost materiálu 0,10 W/mK, pórovitost 22,7 % a míchadlo se otáčí rychlostí 18 otáček za minutu.

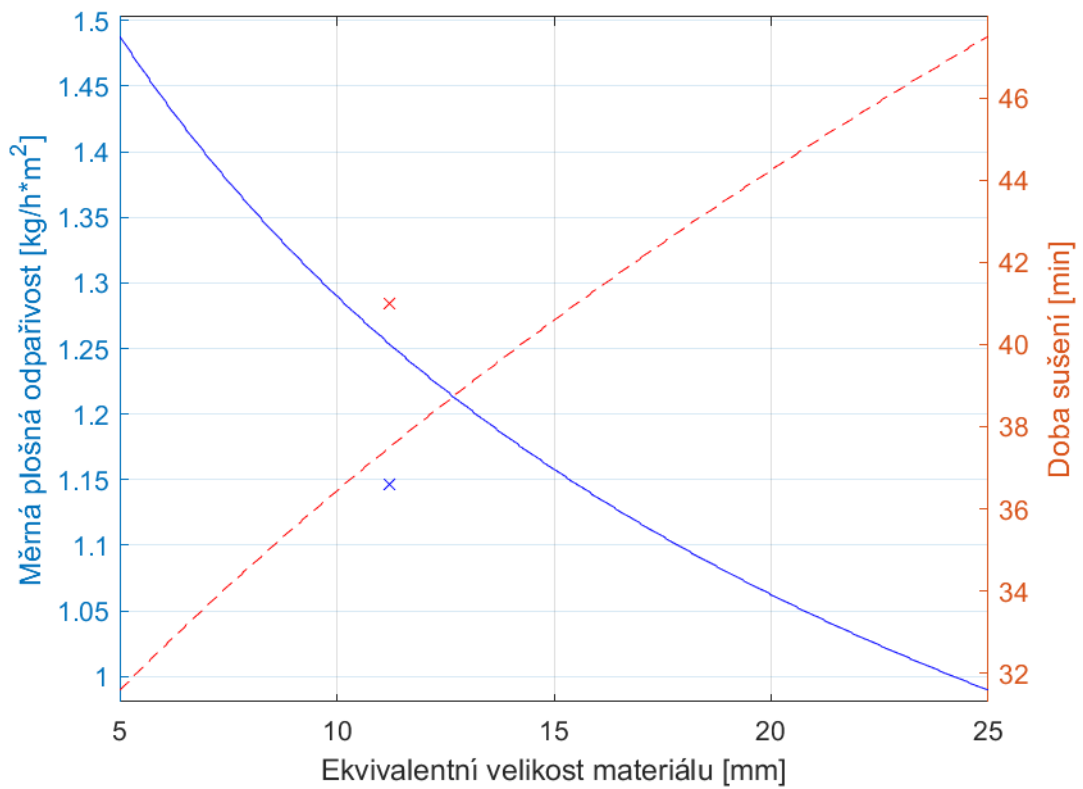
Na posledních třech grafech je pro srovnání s jiným materiálem uveden vliv provozních parametrů – teploty otopu a zaplnění sušárny – a velikosti materiálu pro měření XVIII pro dřevní štěpku. Referenční teplotou ohřevu je v tomto případě 130 °C a 20% zaplnění vnitřního prostoru sušky. Ekvivalentní velikost materiálu pro tento případ je určena pomocí vztahu (4.32), kde jednotlivými ekvivalentními průměry jsou 8,8 mm, 11,8 mm a 18,8 mm. Výsledný ekvivalentní průměr pro tento případ je tedy 13,6 mm.



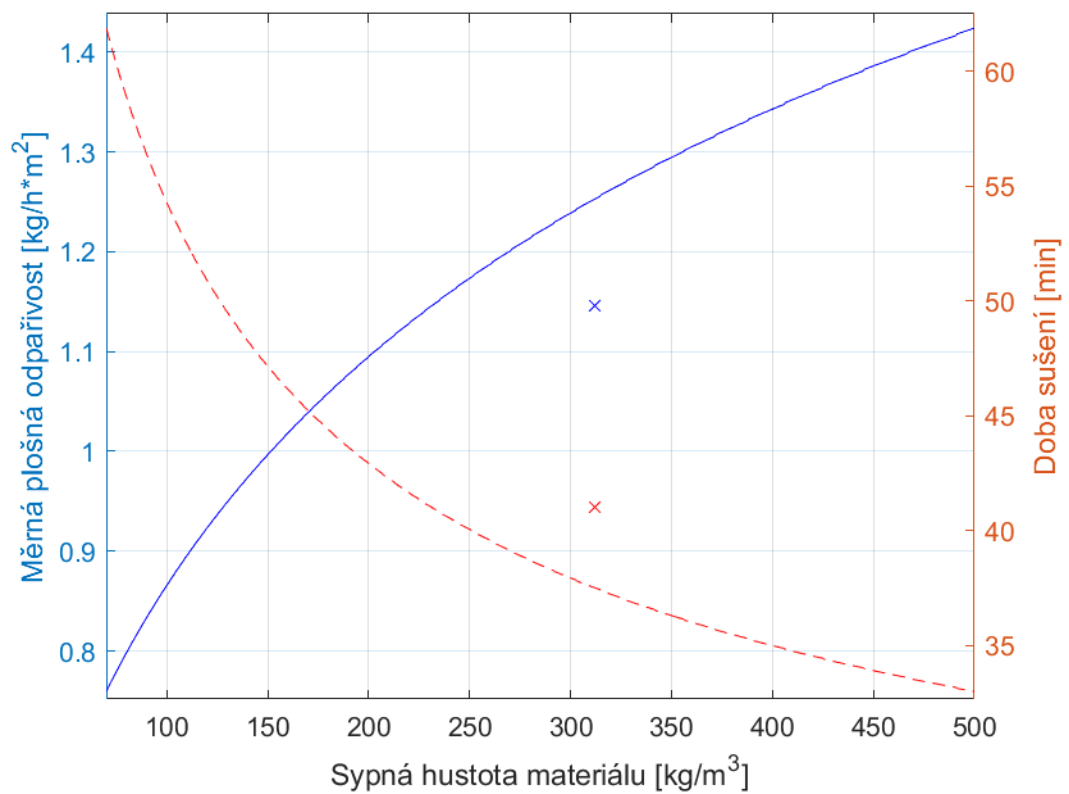
Graf 15: Vliv zaplnění sušky na měrnou plošnou odpařivost a dobu sušení (IV)



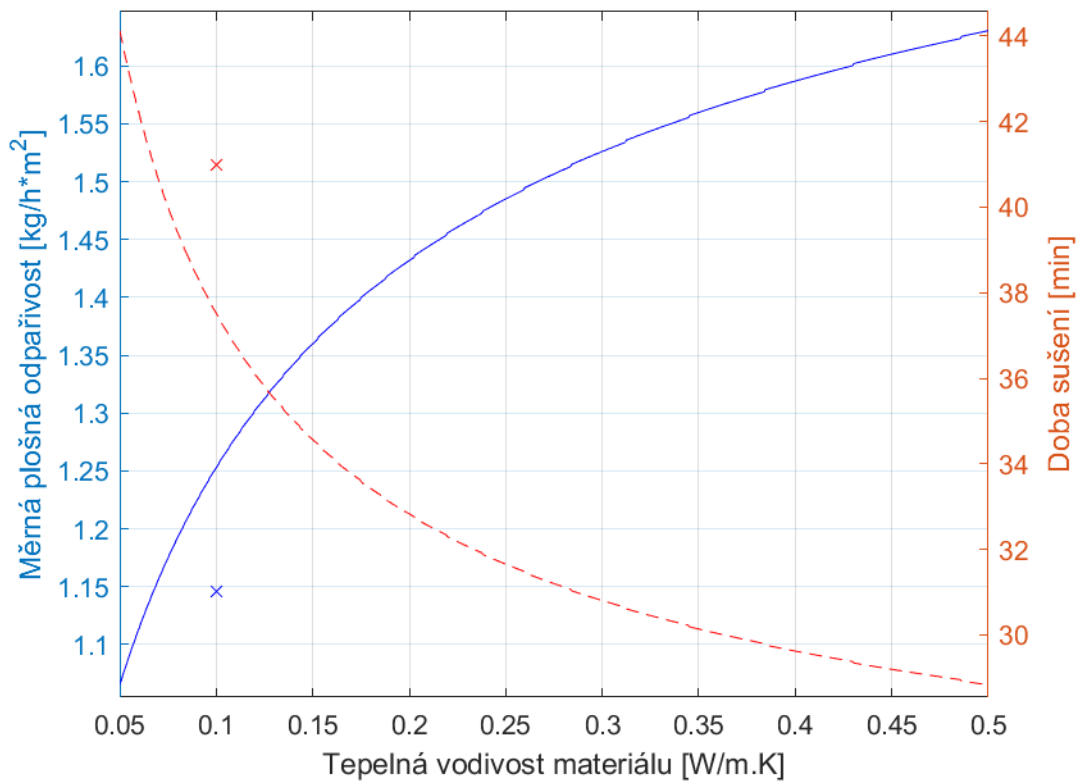
Graf 16: Vliv teploty ohřevu na měrnou plošnou odpařivost a dobu sušení (IV)



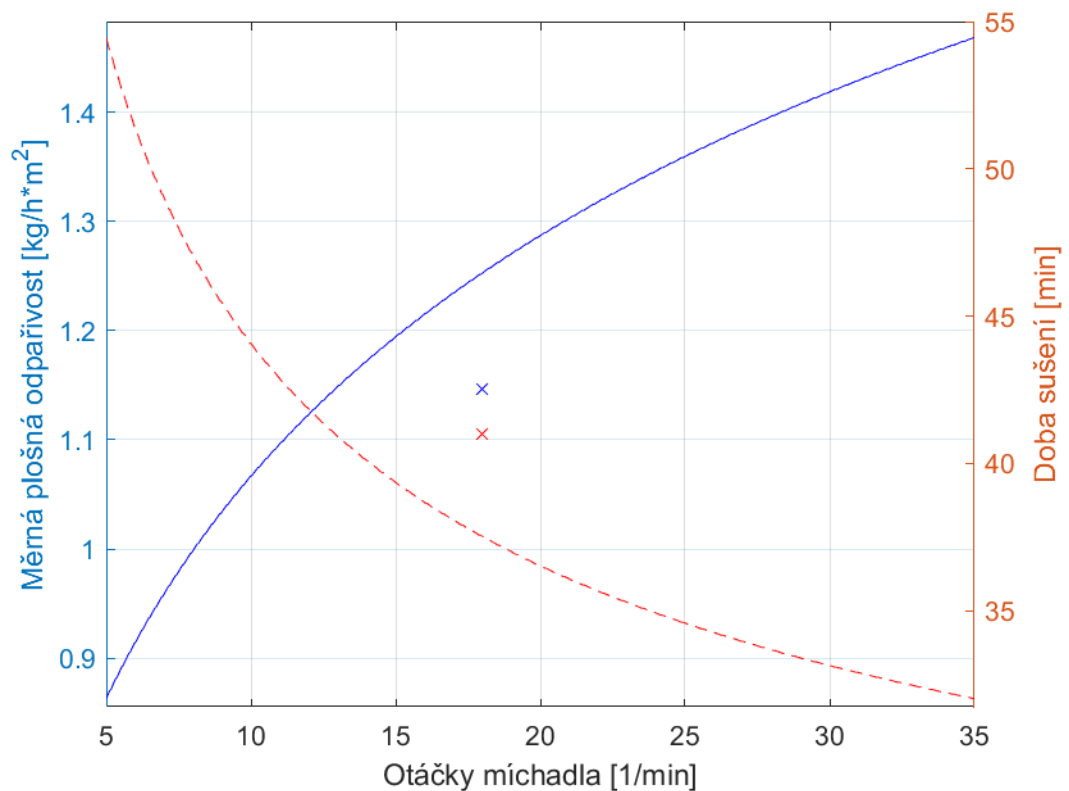
Graf 17: Vliv velikosti materiálu na měrnou plošnou odpařivost a dobu sušení (IV)



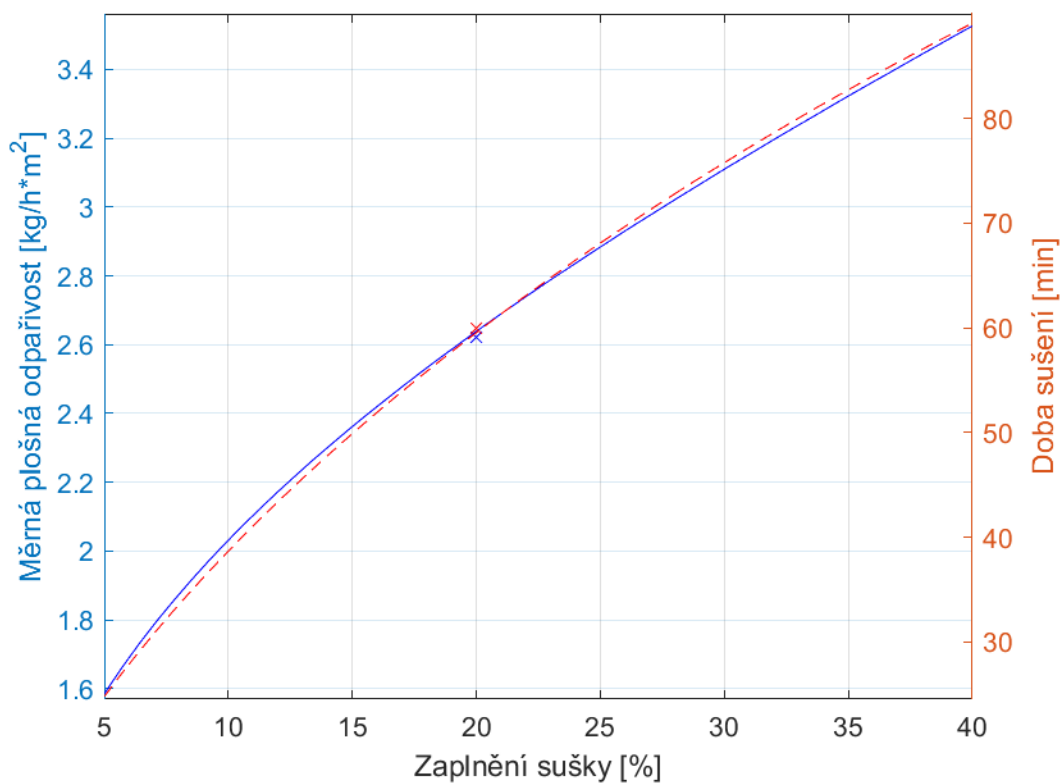
Graf 18: Vliv sypné hustoty materiálu na měrnou plošnou odpařivost a dobu sušení (IV)



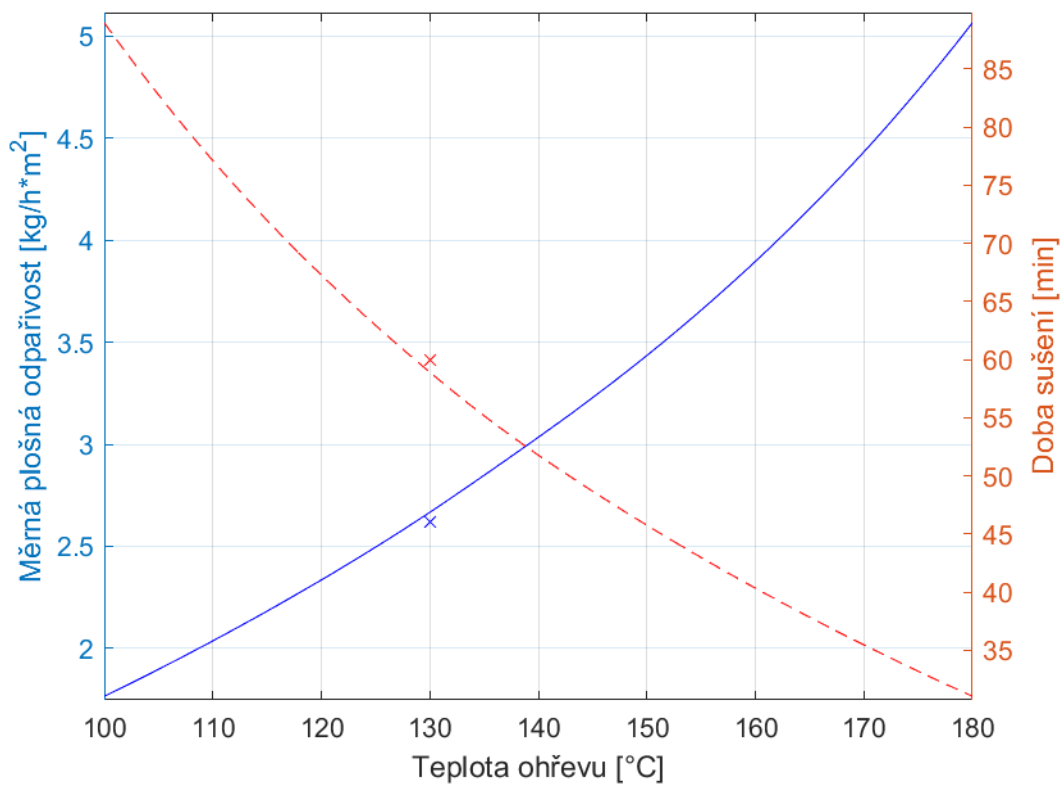
Graf 19: Vliv tepelné vodivosti materiálu na měrnou plošnou odpařivost a dobu sušení (IV)



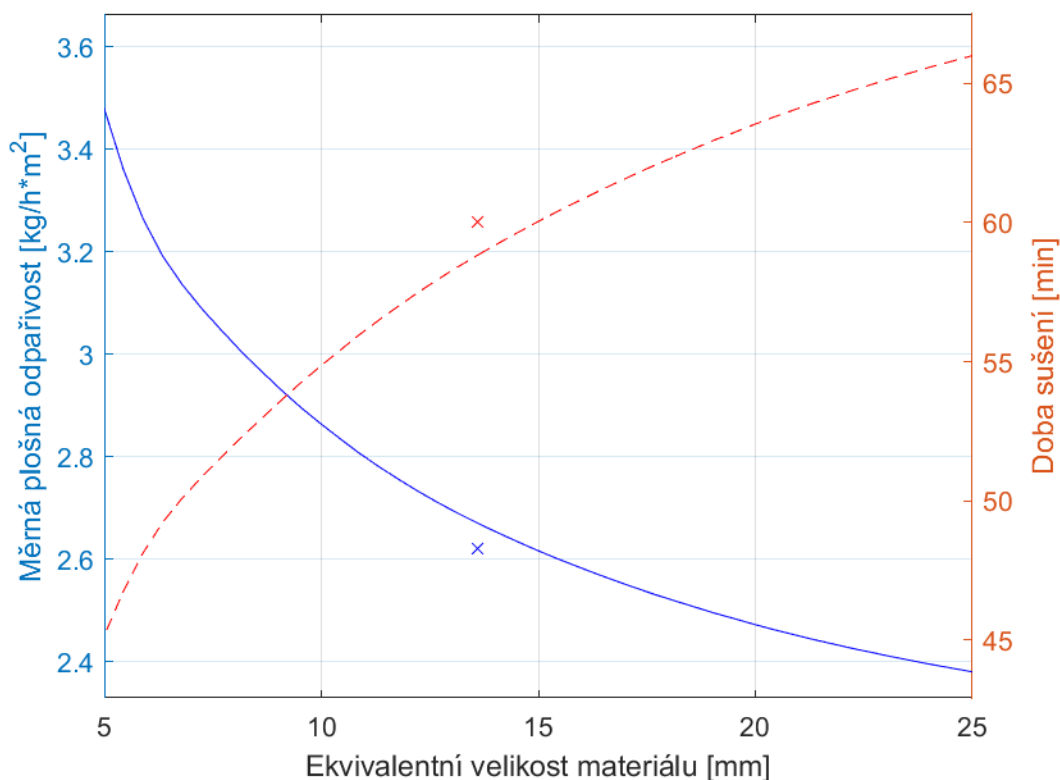
Graf 20: Vliv otáček míchadla na měrnou plošnou odpařivost a dobu sušení (IV)



Graf 21: Vliv zaplnění sušky na měrnou plošnou odpařivost a dobu sušení (XVIII)



Graf 22: Vliv teploty ohřevu na měrnou plošnou odpařivost a dobu sušení (XVIII)



Graf 23: Vliv velikosti materiálu na měrnou plošnou odpařivost a dobu sušení (XVIII)

Na prvním grafu (15) můžeme vidět, že teoretický nárůst měrné plošné odpařivosti a doby sušení je přibližně stejný, což odpovídá poznatkům získaných z experimentálních měření. Dále zkoumaným vlivem je vliv teploty ohřevu, na kterém můžeme vidět, že měrná plošná odpařivost sice roste téměř lineárním tempem, ale křivka doby sušení odpovídá křivce funkce nepřímé úměry. Můžeme vidět, že například zvýšení teploty ze 100 °C na 120 °C přinese přibližně stejný „zisk“ v měrné plošné odpařivosti jako při změně o stejný teplotní rozdíl ze 140 °C na 160 °C, avšak přínos na celkovém času sušení je pro změnu na nižších teplotních hladinách výrazně větší – přibližně 20 minut proti zhruba 5,5 minutám.

Na grafu 17 vidíme, že s rostoucí ekvivalentní velikostí materiálu (výpočet pomocí rovnice 4.27) dochází k nárůstu doby sušení a k poklesu měrné plošné odpařivosti, což odpovídá závěrům z experimentálních měření. Opačné závislosti na růstu parametru – růst měrné plošné odpařivosti a pokles doby sušení – můžeme vidět na grafech 19, 20 a 21 zkoumajících vliv sypné hustoty materiálu, tepelné vodivosti materiálu, respektive otáček míchadla. Na těchto grafech můžeme vidět, že rostoucí i klesající křivky mají tvar odpovídající exponenciální funkci $a \cdot x^b + c$, kde pro rostoucí křivky jsou záporné koeficienty a a b a pro klesající pouze b . Hodnota x představuje měněný parametr. Grafy 21, 22 a 23 ukazují velmi podobné závislosti změny měrné plošné odpařivosti a doby sušení na změně provozních parametrů a velikosti materiálu i pro jiný materiál, než je tomu u měření IV.

8. Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo určit zásadní parametry ovlivňující proces kontaktního sušení a na základě experimentálně určených a teoreticky vypočtených výsledků vyhodnotit jejich vliv na proces sušení. V úvodu práce byla nejdříve v kapitolách 2. a 3. zpracována rešerše na téma biomasa a principy a metody sušení. V kapitole 2 bylo vysvětleno, co je to biomasa. Kapitola tři obsahuje popis principů snižování obsahu vody – sušení. Je v ní také uvedeno rozdělení typů sušáren, vybrané druhy sušáren a jejich porovnání. Poslední teoretickou kapitolou byl popis prostupu tepla u kontaktních sušáren, kde byly na základě odborné literatury rovnice vedoucí k teoretickému výpočtu sušení.

Kapitola 5. se věnuje experimentálním měřením v laboratoři Ústavu energetiky Fakulty strojní ČVUT. V průběhu několika měřících dnů byla získána data pro třináct měření na dvou rozličných materiálech – krmných granulích a dřevní štěpce. Součástí této kapitoly je popis měřících zařízení a průběh měření. V kapitole 5.3. je uveden celkový seznam měření s daty, kdy dané měření proběhlo, se sušeným materiálem, teplotou otopu, nastavením tlaku a se zaplněním sušárny. Dále je v této kapitole uvedeno vzorové vyhodnocení měření. V kapitole 5.5. je uvedeno souhrnné vyhodnocení měření včetně odchylek vlhkostí zjištěných analyticky a bilančně a účinností daných měření. Důležitými hodnotami uvedenými v tabulce 10 jsou vypočítané hodnoty měrných plošných odpařivostí. Ty se ve většině případů drží v rozmezí od 1 do 2 $\text{kg}_w/\text{h}\cdot\text{m}^2$. Nejvýraznější vliv na hodnotu měrné plošné odpařivosti má dle výsledků experimentálních měření zaplnění sušky. Při vyšším zaplnění však sušíme více materiálu a požadovaného vysušení dosáhneme za delší dobu. Teplota otopu pak nejvíce ovlivňuje sklon sušící křivky. Následně je v této kapitole uvedeno celkem šest grafů. První tři (8, 9 a 10) zobrazují sušící křivky všech měření pro daný materiál. Další tři grafy se věnují měřením s materiálem dřevní štěpka, konkrétně vždy změně jednoho z parametrů – zaplnění, teplota otopu a velikost materiálu.

Pro potřeby kapitoly 6. byl v programu MATLAB vytvořen na základě teorie kontaktního sušení (kapitola 4.) vytvořen výpočtový model. Pro jeho správnou funkčnost bylo zapotřebí určit či odhadnout řadu parametrů. Této problematice se ve stručnosti věnuje kapitola 6.1. Následně je v kapitole 6.2. uvedeno srovnání výsledků experimentálních měření s teoretickými výpočty včetně grafu 14 srovnávajícího sušící křivky zjištěné z experimentu a z teorie. Experimentální výsledky a výsledky použitého teoretického modelu jsou obecně v dobré shodě. Můžeme vidět, že odchylky experimentálních a teoretických hodnot se ve většině případů drží v rozmezí $\pm 25\%$.

Pro materiál dřevní štěpka tyto odchylky dokonce nepřesahují hranici 10 % a můžeme pro tato měření říci, že došlo k dobrému odhadu vlastností materiálu a jiných parametrů.

V závěrečné kapitole je, podobně jako v kapitole 5.5., zkoumán vliv změny parametrů sušení na jeho průběh, avšak tato analýza je provedena pomocí teoretického výpočtu, jehož výsledky byly srovnány s experimentálním měřením. Pomocí grafů závislostí na parametrech uvedených v kapitole 7 můžeme udělat rychlou analýzu vlivu změny těchto parametrů. Změnu parametru uvažuji jako zvýšení o 50 %: pro zaplnění změna z 10 % na 15 %, změna otopu ze 100 °C na 150 °C, ekvivalentní velikost materiálu 10 mm a 15 mm, sypaná hustoty 300 a 450 kg/m³, tepelná vodivost 0,1 a 0,15 W/m·K a otáčky 15 a 22,5. Tyto hodnoty jsem volil tak, aby hodnota parametru využívá v daném měření ležela uvnitř či na okraji intervalu.

Porovnáme-li si změny měrných tepelných odpařivostí a teoretických dob sušení u sypané hustoty, tepelné vodivosti a u otáček, získáváme závislost, že při zvoleném zvýšení parametru o 50 % dojde ke zvýšení měrné tepelné odpařivosti u všech parametrů přibližně o 10 % (konkrétně 12 %, 9 % a 11 %) a naopak ke snížení potřebné doby sušení rovněž přibližně o 10 % (konkrétně 11 %, 8 % a 10 %). Stejných hodnot, akorát v opačném smyslu, dosáhneme u zvýšení ekvivalentní velikosti materiálu z 10 na 15 milimetrů. V tomto případě dojde k poklesu měrné tepelné odpařivosti o 10 % a ke zvýšení potřebné doby sušení o 11 %.

Zajímavější je situace při porovnání vlivu zaplnění sušárny a teploty otopu. Při zvýšení zaplnění z 10 na 15 % došlo k navýšení obou zjišťovaných hodnot, konkrétně se o 16 % zvýšila měrná plošná odpařivost a o 29 % teoretická doba sušení. Při zvýšení teploty otopu o 50 % se měrná plošná odpařivost zvýšila dvojnásobně (nárůst přibližně 102 %) a doba sušení se snížila na polovinu. Obdobného zlepšení procesu sušení při dalším navýšení teploty o 50 % ze 150 °C na 225 °C však vzhledem k průběhu křivky doby sušení nedosáhneme.

Velmi podobné charakteristiky vidíme i pro porovnání provozních parametrů a velikosti materiálu pro jiný materiál, konkrétně dřevní štěpku. Při pohledu na vliv zaplnění sušárny, pro měření XVIII konkrétně na rozmezí 15 až 22,5 % zjišťujeme, že měrná plošná odpařivost se zvýší o 17 % a teoretická doba sušení o 28 %. Změny pro teplotu otopu a ekvivalentní velikost materiálu jsem zkoumal pro stejné rozmezí parametrů – 100 až 150 °C a 10 až 15 mm. V případě teploty otopu dochází ke zvýšení měrné plošné odpařivosti o 94 %, tedy opět přibližně na dvojnásobek, a doba sušení je menší o 48 %. Poklesu měrné plošné odpařivosti o 9 % a nárůstu teoretické doby sušení taktéž o 9 % dosáhneme u změny velikosti materiálu.

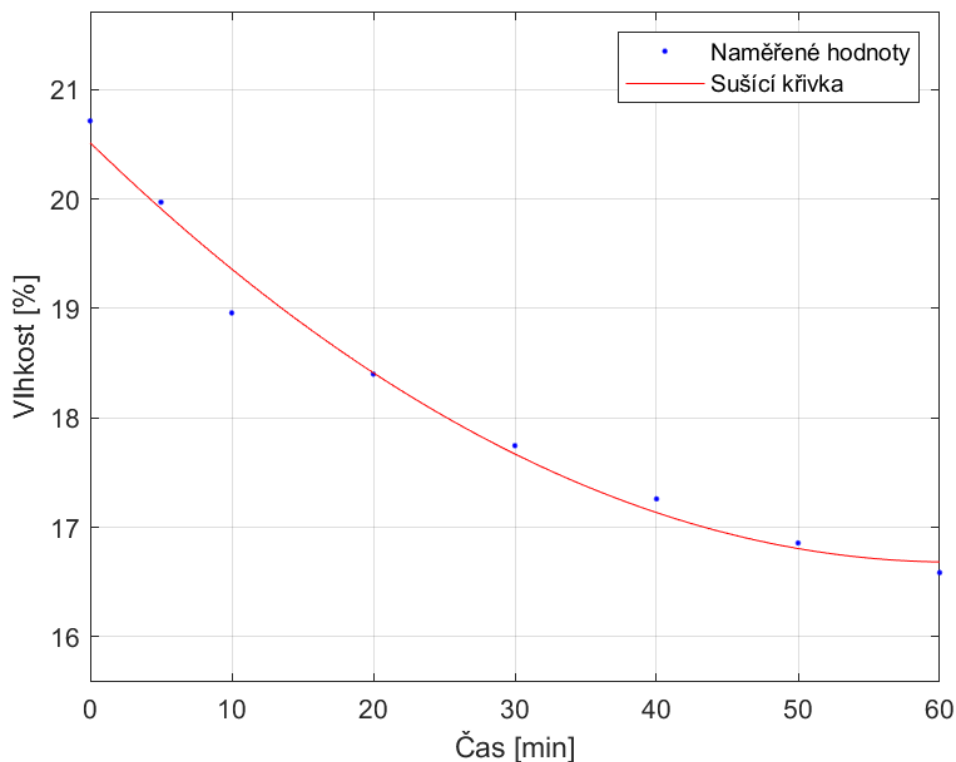
Zdroje

- [1] T. Ochodek, J. Koloni, a P. Janásek, *Potenciál biomasy, druhy, bilance a vlastnosti paliv z biomasy*, I. vydání. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2006.
- [2] J. Hrdlička, „BIOMASA – charakteristika, specifika, obecné vlastnosti 1“, ČVUT, 2019.
- [3] *Vyhláška o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší*. 2012.
- [4] *Zákon o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů*. 2012.
- [5] *Vyhláška o stanovení druhé a parametrů podporovaných obnovitelných zdrojů pro výrobu elektřiny, tepla nebo biometanu a o stanovení a uchování dokumentů*. 2012.
- [6] T. Dlouhý, „Spalování a kotle, 1. přednáška“, ČVUT, 2019.
- [7] T. Utěšil, „Suška na biomasu“, 2010.
- [8] G. Grdzelišvili, „Sušení rostlinných materiálů“, ČVUT.
- [9] M. Chaplin, „Water Activity“. [Online]. Dostupné z: http://www1.lsbu.ac.uk/water/water_activity.html.
- [10] O. Holeček, „Sušení“, VŠCHT.
- [11] J. Zvoníček, *Sušárny*. Praha: ČVUT Praha, 1966.
- [12] M. Richter a O. Söhnle, „Průmyslové technologie III Stroje a zařízení chemického průmyslu“, UJEP, 2013.
- [13] L. Fagernäs, J. Brammer, C. Wilén, M. Lauer, a F. Verhoeff, „Drying of biomass for second generation synfuel production“. .
- [14] D. Šnita, *Chemické inženýrství I.*, 1. vydání. Praha: VŠCHT, 2005.
- [15] „Continuous Fluid Bed Drying System“, *Kurimoto*. [Online]. Dostupné z: <http://www.kurimoto.co.jp/worldwide/en/product/item/07pw/330.php>.
- [16] J. Havlík a T. Dlouhý, „Snižování energetické náročnosti sušení biomasy“, s. 8–14, 2017.
- [17] A. S. Mujumdar, *Handbook of industrial drying*. Boca Raton: CRC Press, 2015.
- [18] *VDI Heat Atlas*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [19] „Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva“. [Online]. Dostupné z: <https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/index.pl?opora=554>.

Příloha A: Vyhodnocení jednotlivých měření

Měření I		
Vstupní vlhkost	[%]	20,6
Výstupní vlhkost	[%]	11,4
Hmotnost biomasy na vstupu do sušky	[kg]	1,936
Hmotnost sušiny	[kg]	1,538
Hmotnost vody na vstupu	[kg]	0,398
Obsah vody na vstupu	[%]	20,7
Hmotnost biomasy na výstupu ze sušky	[kg]	1,796
Hmotnost nevysušené vody	[kg]	0,258
Hmotnost vysušené vody	[kg]	0,140
Dopočítaná vlhkost	[%]	14,7
Odchylka měření	[%]	-30,6
Měrná plošná odpařivost	$[kg_w \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}]$	0,17
Měrná objemová odpařivost	$[kg_w \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}]$	2,72
Energetická náročnost sušení	$[kJ \cdot kg_w^{-1}]$	8 740
Účinnost sušení	[%]	53,9

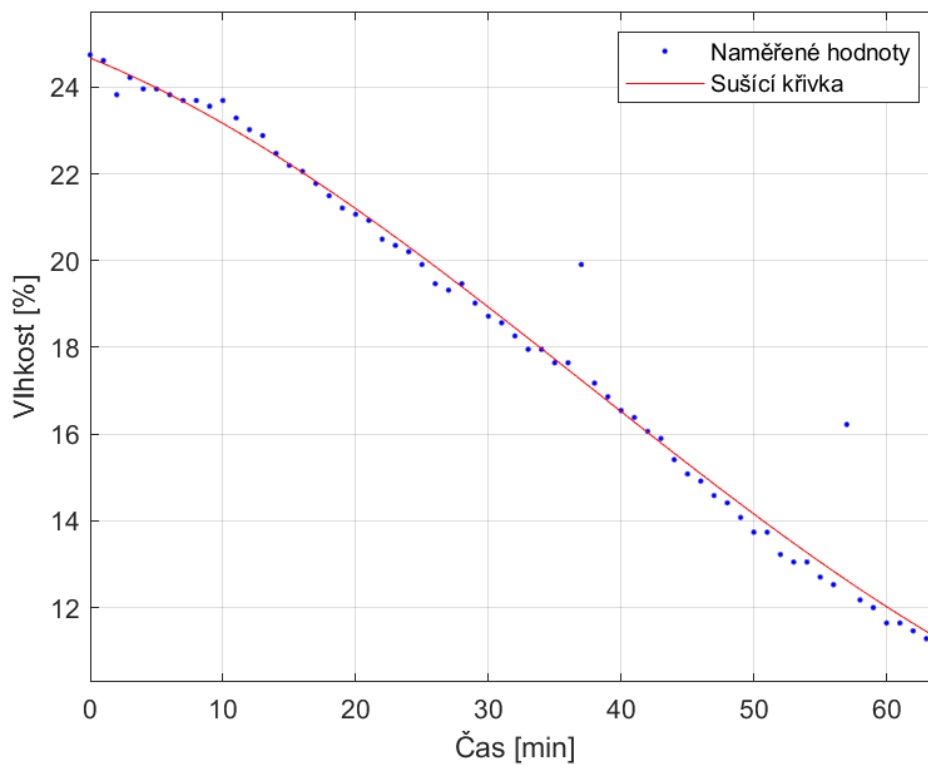
Tabulka 13: Výsledky měření I



Graf 24: Sušící křivka pro měření I

Měření II		
Vstupní vlhkost	[%]	26,1
Výstupní vlhkost	[%]	12,6
Hmotnost biomasy na vstupu do sušky	[kg]	2,954
Hmotnost sušiny	[kg]	2,182
Hmotnost vody na vstupu	[kg]	0,772
Obsah vody na vstupu	[%]	24,7
Hmotnost biomasy na výstupu ze sušky	[kg]	2,430
Hmotnost nevysušené vody	[kg]	0,248
Hmotnost vysušené vody	[kg]	0,524
Dopočítaná vlhkost	[%]	10,2
Odchylka měření	[%]	7,3
Měrná plošná odpařivost	$[kg_w \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}]$	0,61
Měrná objemová odpařivost	$[kg_w \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}]$	9,54
Energetická náročnost sušení	$[kJ \cdot kg_w^{-1}]$	5 220
Účinnost sušení	[%]	57,6

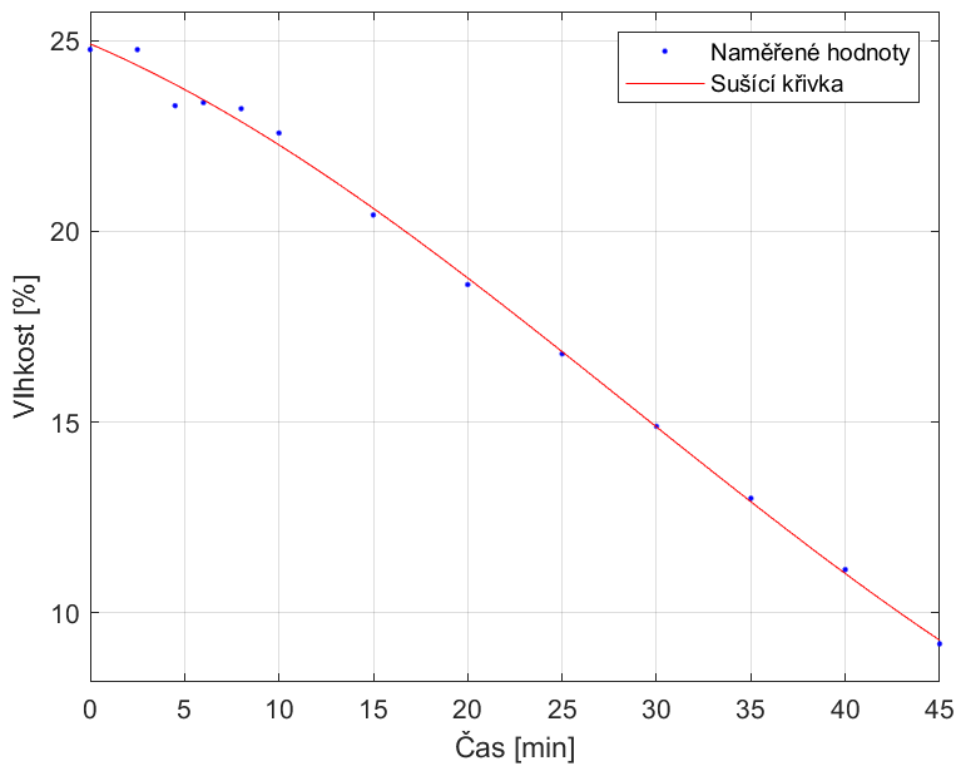
Tabulka 14: Výsledky měření II



Graf 25: Sušící křivka pro měření II

Měření III		
Vstupní vlhkost	[%]	24,8
Výstupní vlhkost	[%]	9,3
Hmotnost biomasy na vstupu do sušky	[kg]	1,980
Hmotnost sušiny	[kg]	1,490
Hmotnost vody na vstupu	[kg]	0,490
Obsah vody na vstupu	[%]	24,8
Hmotnost biomasy na výstupu ze sušky	[kg]	1,636
Hmotnost nevysušené vody	[kg]	0,146
Hmotnost vysušené vody	[kg]	0,344
Dopočítaná vlhkost	[%]	9,0
Odchylka měření	[%]	2,0
Měrná plošná odpařivost	$[kg_w \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}]$	0,57
Měrná objemová odpařivost	$[kg_w \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}]$	8,91
Energetická náročnost sušení	$[kJ \cdot kg_w^{-1}]$	9 830
Účinnost sušení	[%]	30,9

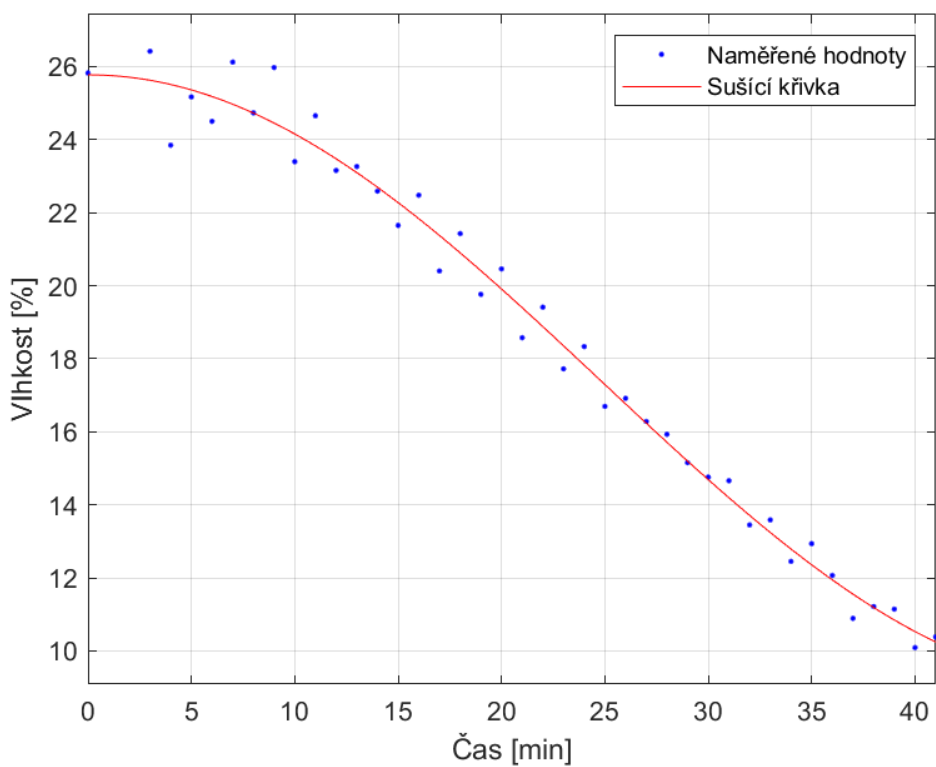
Tabulka 15: Výsledky měření III



Graf 26: Sušící křivka pro měření III

Měření IV		
Vstupní vlhkost	[%]	25,8
Výstupní vlhkost	[%]	5,5
Hmotnost biomasy na vstupu do sušky	[kg]	2,966
Hmotnost sušiny	[kg]	2,200
Hmotnost vody na vstupu	[kg]	0,766
Obsah vody na vstupu	[%]	25,8
Hmotnost biomasy na výstupu ze sušky	[kg]	2,336
Hmotnost nevysušené vody	[kg]	0,136
Hmotnost vysušené vody	[kg]	0,630
Dopočítaná vlhkost	[%]	5,8
Odchylka měření	[%]	-1,6
Měrná plošná odpařivost	$[kg_w \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}]$	1,15
Měrná objemová odpařivost	$[kg_w \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}]$	17,91
Energetická náročnost sušení	$[kJ \cdot kg_w^{-1}]$	10 200
Účinnost sušení	[%]	30,5

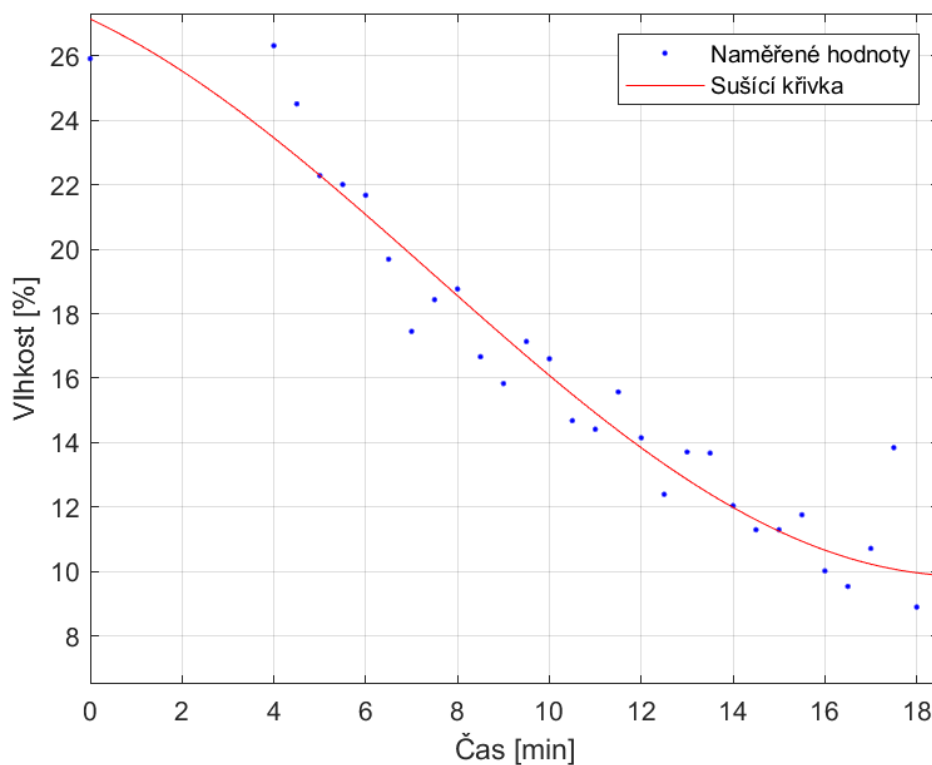
Tabulka 16: Výsledky měření IV



Graf 27: Sušící křivka pro měření IV

Měření V		
Vstupní vlhkost	[%]	25,9
Výstupní vlhkost	[%]	15,2
Hmotnost biomasy na vstupu do sušky	[kg]	2,956
Hmotnost sušiny	[kg]	2,190
Hmotnost vody na vstupu	[kg]	0,766
Obsah vody na vstupu	[%]	25,9
Hmotnost biomasy na výstupu ze sušky	[kg]	2,592
Hmotnost nevysušené vody	[kg]	0,402
Hmotnost vysušené vody	[kg]	0,364
Dopočítaná vlhkost	[%]	15,5
Odchylka měření	[%]	-2,7
Měrná plošná odpařivost	$[kg_w \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}]$	1,47
Měrná objemová odpařivost	$[kg_w \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}]$	22,94
Energetická náročnost sušení	$[kJ \cdot kg_w^{-1}]$	8 680
Účinnost sušení	[%]	39,9

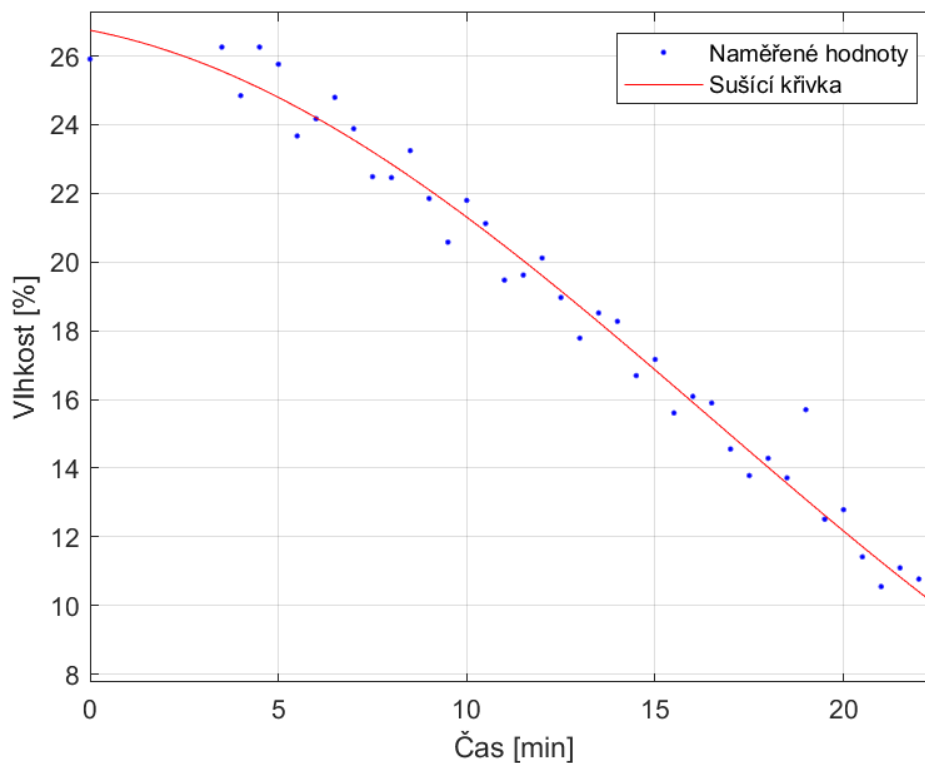
Tabulka 17: Výsledky měření V



Graf 28: Sušící křivka pro měření V

Měření VI		
Vstupní vlhkost	[%]	25,9
Výstupní vlhkost	[%]	8,7
Hmotnost biomasy na vstupu do sušky	[kg]	2,964
Hmotnost sušiny	[kg]	2,196
Hmotnost vody na vstupu	[kg]	0,768
Obsah vody na vstupu	[%]	25,9
Hmotnost biomasy na výstupu ze sušky	[kg]	2,398
Hmotnost nevysušené vody	[kg]	0,202
Hmotnost vysušené vody	[kg]	0,566
Dopočítaná vlhkost	[%]	8,4
Odchylka měření	[%]	1,7
Měrná plošná odpařivost	$[kg_W \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}]$	1,88
Měrná objemová odpařivost	$[kg_W \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}]$	29,32
Energetická náročnost sušení	$[kJ \cdot kg_W^{-1}]$	8 190
Účinnost sušení	[%]	38,9

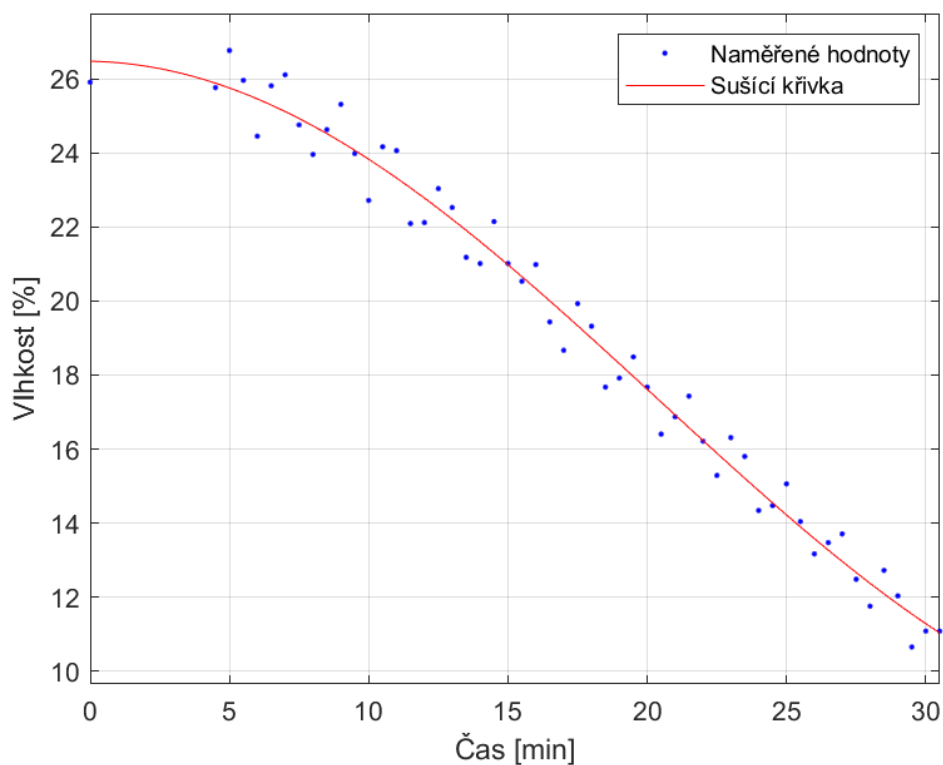
Tabulka 18: Výsledky měření VI



Graf 29: Sušící křivka pro měření VI

Měření VII		
Vstupní vlhkost	[%]	25,9
Výstupní vlhkost	[%]	9,3
Hmotnost biomasy na vstupu do sušky	[kg]	2,998
Hmotnost sušiny	[kg]	2,221
Hmotnost vody na vstupu	[kg]	0,777
Obsah vody na vstupu	[%]	25,9
Hmotnost biomasy na výstupu ze sušky	[kg]	2,454
Hmotnost nevysušené vody	[kg]	0,233
Hmotnost vysušené vody	[kg]	0,544
Dopočítaná vlhkost	[%]	9,5
Odchylka měření	[%]	-1,1
Měrná plošná odpařivost	$[kg_w \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}]$	1,33
Měrná objemová odpařivost	$[kg_w \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}]$	20,79
Energetická náročnost sušení	$[kJ \cdot kg_w^{-1}]$	9 300
Účinnost sušení	[%]	34,4

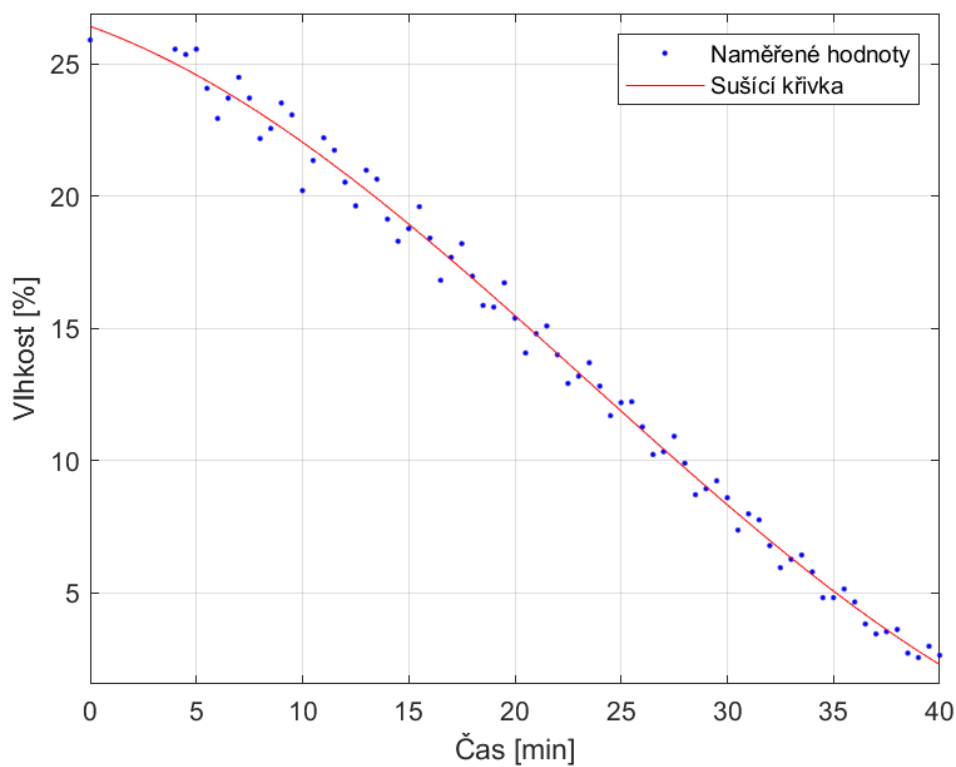
Tabulka 19: Výsledky měření VII



Graf 30: Sušící křivka pro měření VII

Měření VIII		
Vstupní vlhkost	[%]	25,9
Výstupní vlhkost	[%]	3,3
Hmotnost biomasy na vstupu do sušky	[kg]	2,982
Hmotnost sušiny	[kg]	2,209
Hmotnost vody na vstupu	[kg]	0,773
Obsah vody na vstupu	[%]	25,9
Hmotnost biomasy na výstupu ze sušky	[kg]	2,302
Hmotnost nevysušené vody	[kg]	0,093
Hmotnost vysušené vody	[kg]	0,680
Dopočítaná vlhkost	[%]	4,0
Odchylka měření	[%]	-3,2
Měrná plošná odpařivost	$[kg_W \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}]$	1,27
Měrná objemová odpařivost	$[kg_W \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}]$	19,82
Energetická náročnost sušení	$[kJ \cdot kg_W^{-1}]$	6 920
Účinnost sušení	[%]	47,5

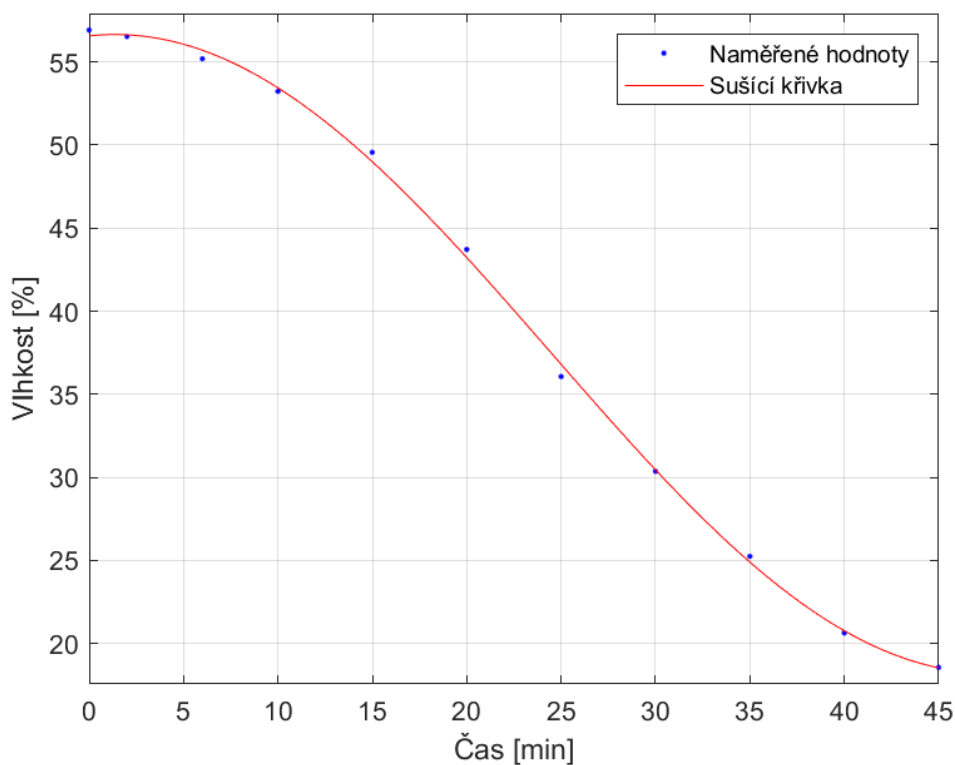
Tabulka 20: Výsledky měření VIII



Graf 31: Sušící křivka pro měření VIII

Měření IX		
Vstupní vlhkost	[%]	56,7
Výstupní vlhkost	[%]	7,5
Hmotnost biomasy na vstupu do sušky	[kg]	2,020
Hmotnost sušiny	[kg]	0,875
Hmotnost vody na vstupu	[kg]	1,145
Obsah vody na vstupu	[%]	56,9
Hmotnost biomasy na výstupu ze sušky	[kg]	1,026
Hmotnost nevysušené vody	[kg]	0,151
Hmotnost vysušené vody	[kg]	0,994
Dopočítaná vlhkost	[%]	14,8
Odchylka měření	[%]	-14,3
Měrná plošná odpařivost	$[kg_w \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}]$	1,65
Měrná objemová odpařivost	$[kg_w \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}]$	25,75
Energetická náročnost sušení	$[kJ \cdot kg_w^{-1}]$	4 890
Účinnost sušení	[%]	57,6

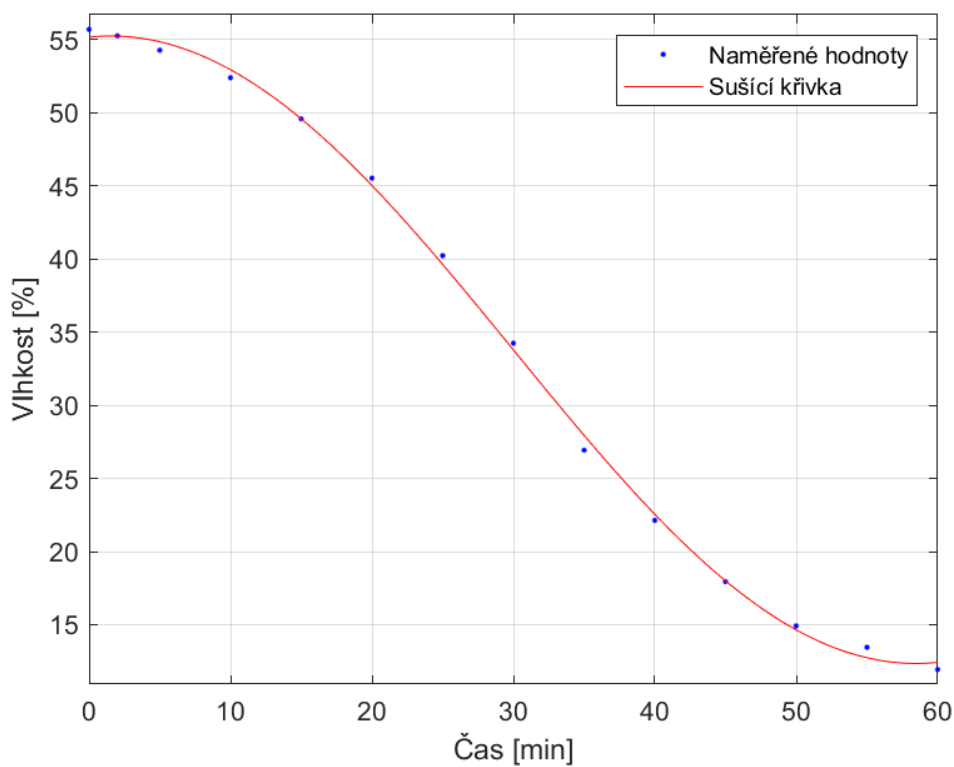
Tabulka 21: Výsledky měření IX



Graf 32: Sušící křivka pro měření IX

Měření X		
Vstupní vlhkost	[%]	56,7
Výstupní vlhkost	[%]	2,8
Hmotnost biomasy na vstupu do sušky	[kg]	3,946
Hmotnost sušiny	[kg]	1,708
Hmotnost vody na vstupu	[kg]	2,238
Obsah vody na vstupu	[%]	55,7
Hmotnost biomasy na výstupu ze sušky	[kg]	1,906
Hmotnost nevysušené vody	[kg]	0,198
Hmotnost vysušené vody	[kg]	2,040
Dopočítaná vlhkost	[%]	10,4
Odchylka měření	[%]	-15,9
Měrná plošná odpařivost	$[kg_W \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}]$	2,54
Měrná objemová odpařivost	$[kg_W \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}]$	39,63
Energetická náročnost sušení	$[kJ \cdot kg_W^{-1}]$	-
Účinnost sušení	[%]	-

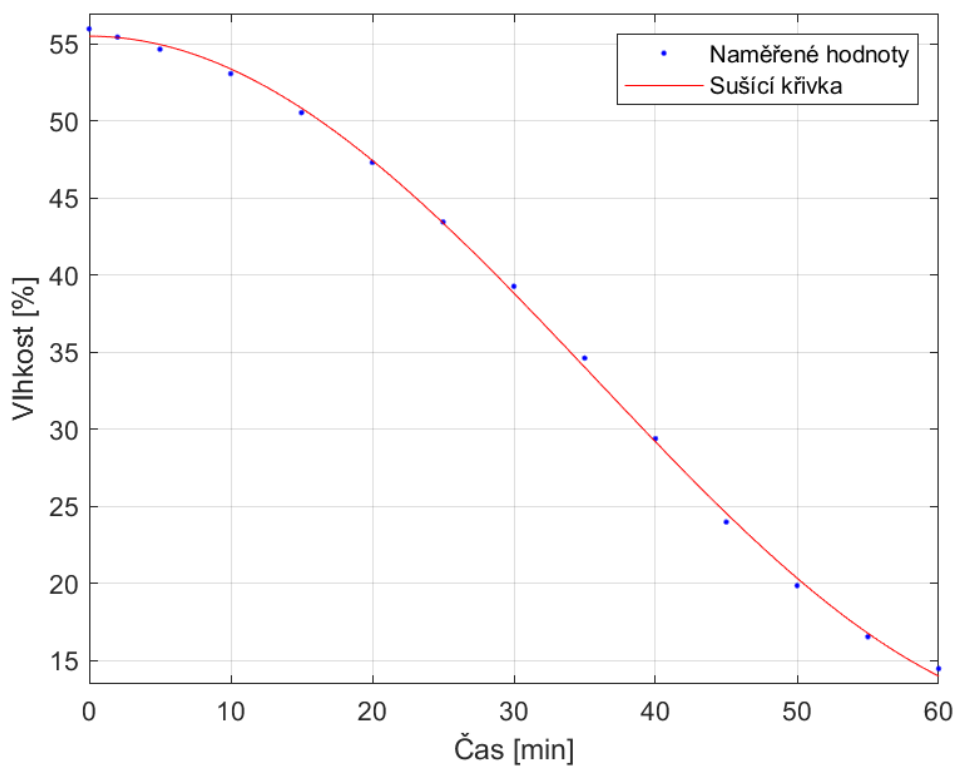
Tabulka 22: Výsledky měření X



Graf 33: Sušící křivka pro měření X

Měření XI		
Vstupní vlhkost	[%]	56,7
Výstupní vlhkost	[%]	3,1
Hmotnost biomasy na vstupu do sušky	[kg]	5,590
Hmotnost sušiny	[kg]	2,42
Hmotnost vody na vstupu	[kg]	3,170
Obsah vody na vstupu	[%]	56,0
Hmotnost biomasy na výstupu ze sušky	[kg]	2,756
Hmotnost nevysušené vody	[kg]	0,336
Hmotnost vysušené vody	[kg]	2,834
Dopočítaná vlhkost	[%]	12,2
Odchylka měření	[%]	-18,4
Měrná plošná odpařivost	$[kg_W \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}]$	3,52
Měrná objemová odpařivost	$[kg_W \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}]$	55,06
Energetická náročnost sušení	$[kJ \cdot kg_W^{-1}]$	-
Účinnost sušení	[%]	-

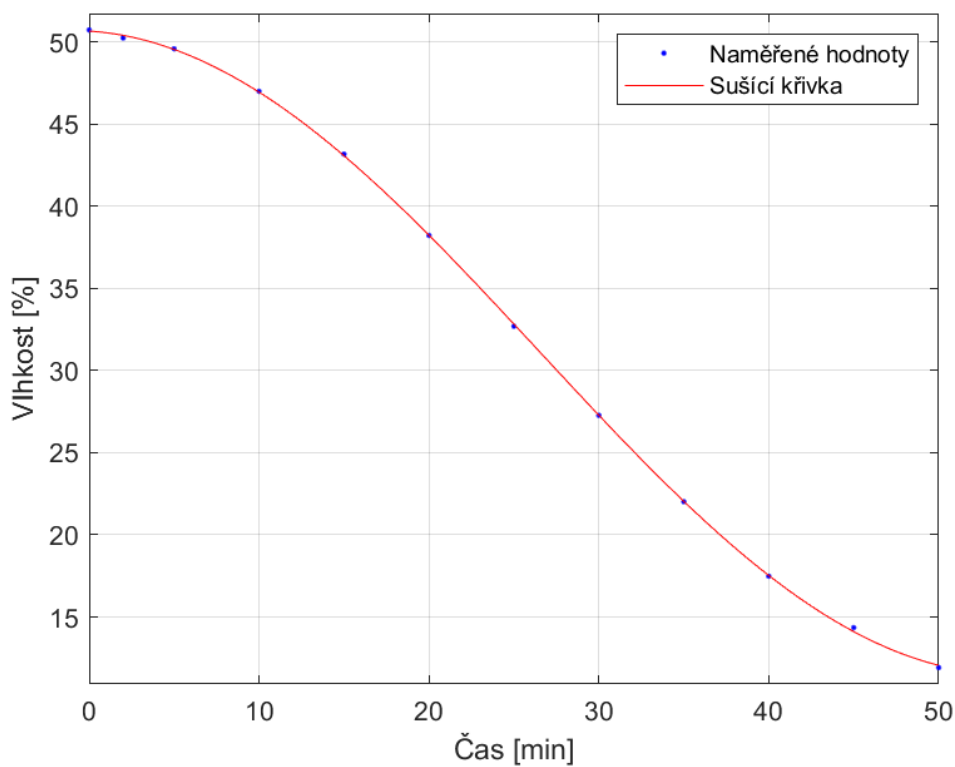
Tabulka 23: Výsledky měření XI



Graf 34: Sušící křivka pro měření XI

Měření XII		
Vstupní vlhkost	[%]	50,5
Výstupní vlhkost	[%]	5,7
Hmotnost biomasy na vstupu do sušky	[kg]	2,008
Hmotnost sušiny	[kg]	0,994
Hmotnost vody na vstupu	[kg]	1,014
Obsah vody na vstupu	[%]	50,7
Hmotnost biomasy na výstupu ze sušky	[kg]	1,112
Hmotnost nevysušené vody	[kg]	0,118
Hmotnost vysušené vody	[kg]	0,896
Dopočítaná vlhkost	[%]	10,7
Odchylka měření	[%]	-10,6
Měrná plošná odpařivost	$[kg_w \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}]$	1,34
Měrná objemová odpařivost	$[kg_w \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}]$	20,89
Energetická náročnost sušení	$[kJ \cdot kg_w^{-1}]$	-
Účinnost sušení	[%]	-

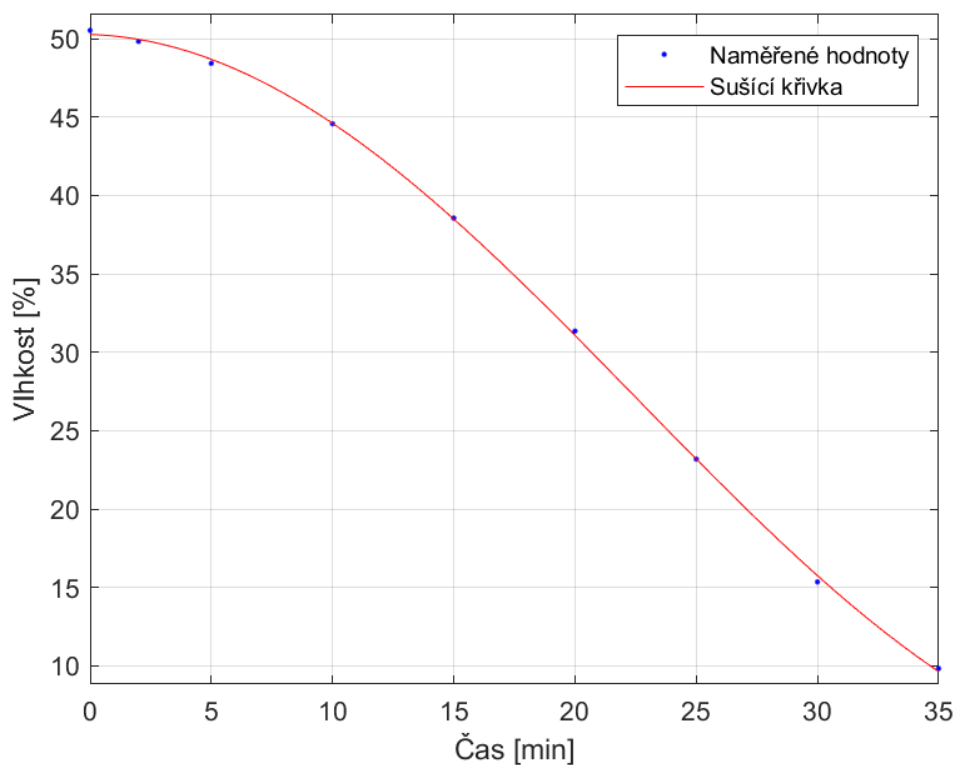
Tabulka 24: Výsledky měření XII



Graf 35: Sušící křivka pro měření XII

Měření XIII		
Vstupní vlhkost	[%]	50,5
Výstupní vlhkost	[%]	7,1
Hmotnost biomasy na vstupu do sušky	[kg]	2,012
Hmotnost sušiny	[kg]	0,996
Hmotnost vody na vstupu	[kg]	1,017
Obsah vody na vstupu	[%]	50,5
Hmotnost biomasy na výstupu ze sušky	[kg]	1,088
Hmotnost nevysušené vody	[kg]	0,092
Hmotnost vysušené vody	[kg]	0,924
Dopočítaná vlhkost	[%]	8,5
Odchylka měření	[%]	-3,3
Měrná plošná odpařivost	[kg _w · h ⁻¹ · m ⁻²]	1,97
Měrná objemová odpařivost	[kg _w · h ⁻¹ · m ⁻³]	30,77
Energetická náročnost sušení	[kJ · kg _w ⁻¹]	4 400
Účinnost sušení	[%]	63,3

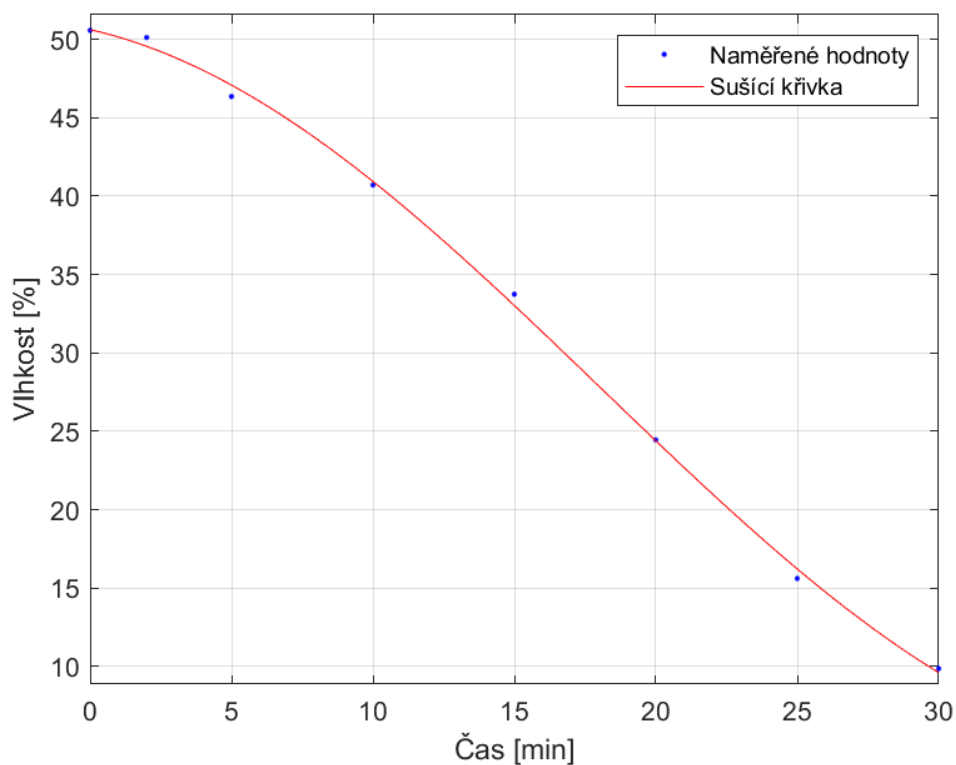
Tabulka 25: Výsledky měření XIII



Graf 36: Sušící křivka pro měření XIII

Měření XIV		
Vstupní vlhkost	[%]	50,5
Výstupní vlhkost	[%]	3,8
Hmotnost biomasy na vstupu do sušky	[kg]	1,982
Hmotnost sušiny	[kg]	0,981
Hmotnost vody na vstupu	[kg]	1,001
Obsah vody na vstupu	[%]	50,6
Hmotnost biomasy na výstupu ze sušky	[kg]	1,052
Hmotnost nevysušené vody	[kg]	0,071
Hmotnost vysušené vody	[kg]	0,930
Dopočítaná vlhkost	[%]	6,8
Odchylka měření	[%]	-6,2
Měrná plošná odpařivost	$[kg_w \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}]$	2,31
Měrná objemová odpařivost	$[kg_w \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}]$	36,14
Energetická náročnost sušení	$[kJ \cdot kg_w^{-1}]$	4 650
Účinnost sušení	[%]	62,9

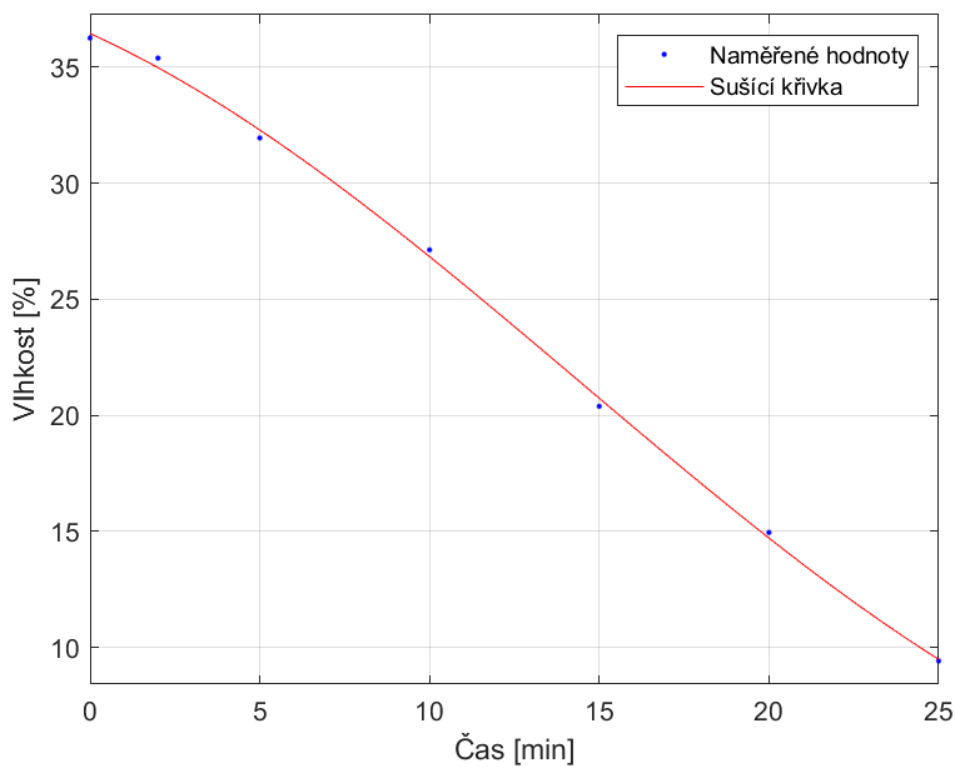
Tabulka 26: Výsledky měření XIV



Graf 37: Sušící křivka pro měření XIV

Měření XV		
Vstupní vlhkost	[%]	37,3
Výstupní vlhkost	[%]	11,5
Hmotnost biomasy na vstupu do sušky	[kg]	1,510
Hmotnost sušiny	[kg]	0,947
Hmotnost vody na vstupu	[kg]	0,563
Obsah vody na vstupu	[%]	36,3
Hmotnost biomasy na výstupu ze sušky	[kg]	1,024
Hmotnost nevysušené vody	[kg]	0,077
Hmotnost vysušené vody	[kg]	0,486
Dopočítaná vlhkost	[%]	7,5
Odchylka měření	[%]	11,7
Měrná plošná odpařivost	$[kg_w \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}]$	1,45
Měrná objemová odpařivost	$[kg_w \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}]$	22,66
Energetická náročnost sušení	$[kJ \cdot kg_w^{-1}]$	4 070
Účinnost sušení	[%]	67,3

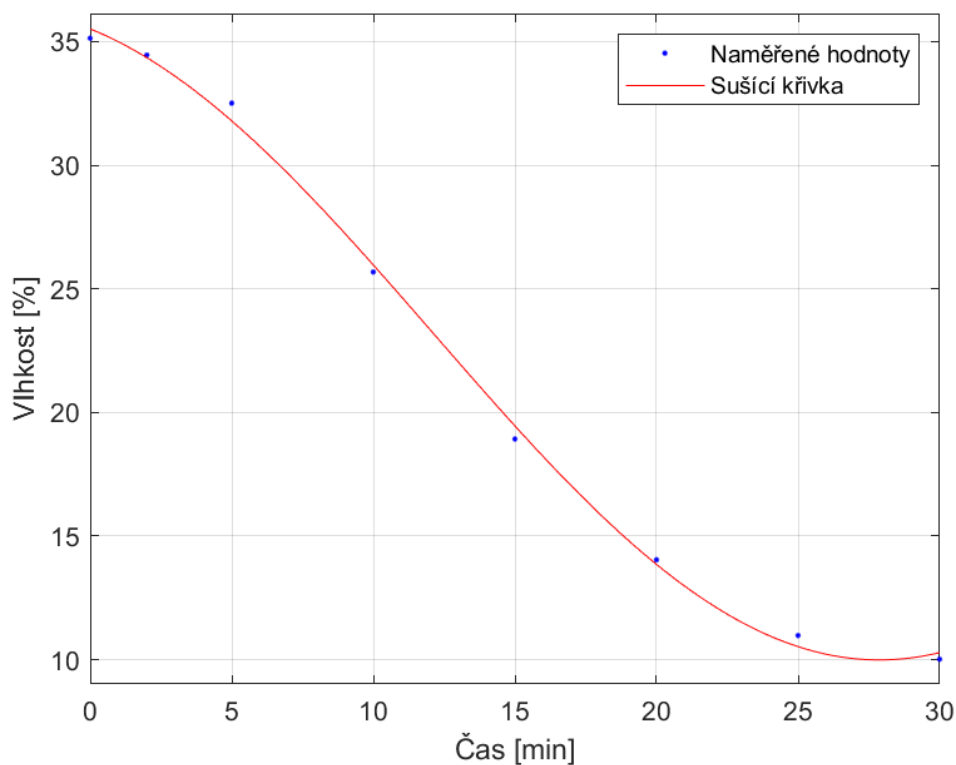
Tabulka 27: Výsledky měření XV



Graf 38: Sušící křivka pro měření XV

Měření XVI		
Vstupní vlhkost	[%]	37,3
Výstupní vlhkost	[%]	3,5
Hmotnost biomasy na vstupu do sušky	[kg]	1,592
Hmotnost sušiny	[kg]	0,999
Hmotnost vody na vstupu	[kg]	0,593
Obsah vody na vstupu	[%]	35,1
Hmotnost biomasy na výstupu ze sušky	[kg]	1,022
Hmotnost nevysušené vody	[kg]	0,023
Hmotnost vysušené vody	[kg]	0,570
Dopočítaná vlhkost	[%]	2,3
Odchylka měření	[%]	-2,6
Měrná plošná odpařivost	$[kg_w \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}]$	1,42
Měrná objemová odpařivost	$[kg_w \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}]$	22,15
Energetická náročnost sušení	$[kJ \cdot kg_w^{-1}]$	-
Účinnost sušení	[%]	-

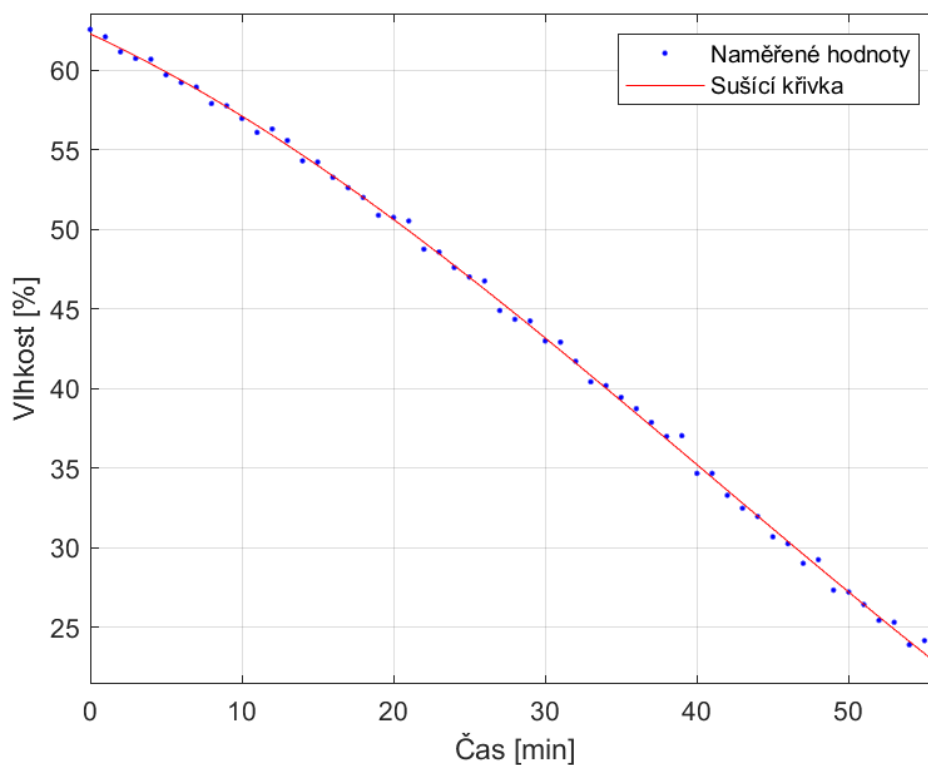
Tabulka 28: Výsledky měření XVI



Graf 39: Sušící křivka pro měření XVI

Měření XVII		
Vstupní vlhkost	[%]	62,1
Výstupní vlhkost	[%]	22,7
Hmotnost biomasy na vstupu do sušky	[kg]	2,340
Hmotnost sušiny	[kg]	0,886
Hmotnost vody na vstupu	[kg]	1,454
Obsah vody na vstupu	[%]	62,6
Hmotnost biomasy na výstupu ze sušky	[kg]	1,150
Hmotnost nevysušené vody	[kg]	0,264
Hmotnost vysušené vody	[kg]	1,190
Dopočítaná vlhkost	[%]	22,9
Odchylka měření	[%]	0,6
Měrná plošná odpařivost	$[kg_w \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}]$	1,59
Měrná objemová odpařivost	$[kg_w \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}]$	24,77
Energetická náročnost sušení	$[kJ \cdot kg_w^{-1}]$	4 350
Účinnost sušení	[%]	60,7

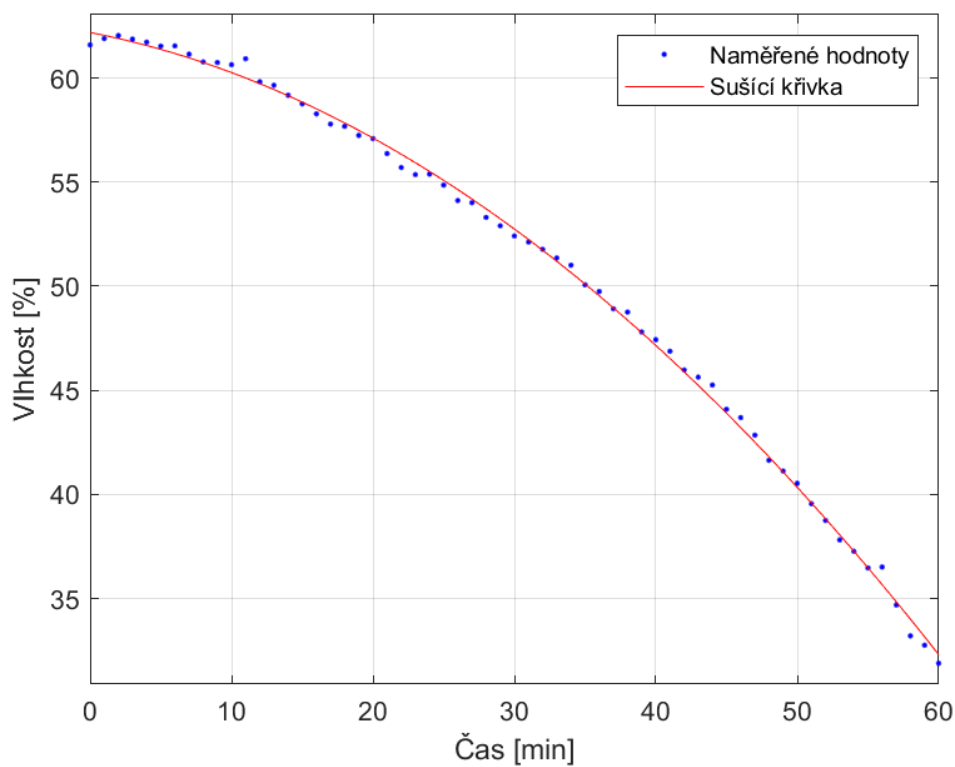
Tabulka 29: Výsledky měření XVII



Graf 40: Sušící křivka pro měření XVII

Měření XVIII		
Vstupní vlhkost	[%]	62,1
Výstupní vlhkost	[%]	31,4
Hmotnost biomasy na vstupu do sušky	[kg]	4,736
Hmotnost sušiny	[kg]	1,794
Hmotnost vody na vstupu	[kg]	2,942
Obsah vody na vstupu	[%]	61,6
Hmotnost biomasy na výstupu ze sušky	[kg]	2,630
Hmotnost nevysušené vody	[kg]	0,836
Hmotnost vysušené vody	[kg]	2,106
Dopočítaná vlhkost	[%]	31,8
Odchylka měření	[%]	-2,9
Měrná plošná odpařivost	$[kg_w \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}]$	2,62
Měrná objemová odpařivost	$[kg_w \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}]$	40,92
Energetická náročnost sušení	$[kJ \cdot kg_w^{-1}]$	4 040
Účinnost sušení	[%]	65,8

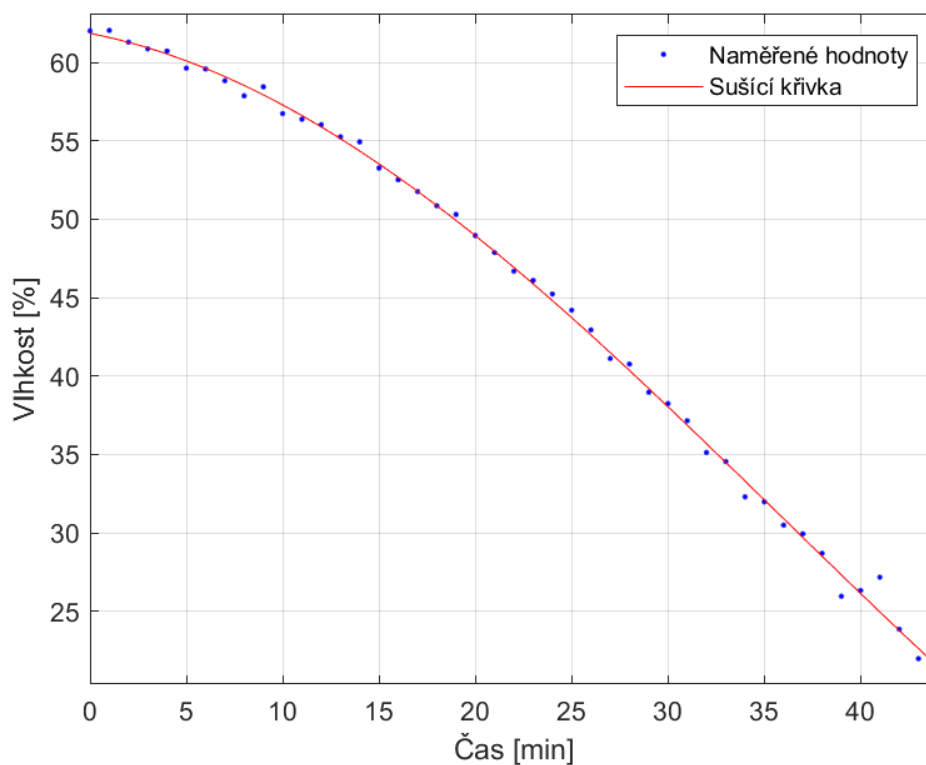
Tabulka 30: Výsledky měření XVIII



Graf 41: Sušící křivka pro měření XVIII

Měření XIX		
Vstupní vlhkost	[%]	62,1
Výstupní vlhkost	[%]	18,3
Hmotnost biomasy na vstupu do sušky	[kg]	2,338
Hmotnost sušiny	[kg]	0,886
Hmotnost vody na vstupu	[kg]	1,452
Obsah vody na vstupu	[%]	62,0
Hmotnost biomasy na výstupu ze sušky	[kg]	1,108
Hmotnost nevysušené vody	[kg]	0,222
Hmotnost vysušené vody	[kg]	1,230
Dopočítaná vlhkost	[%]	20,1
Odchylka měření	[%]	-4,3
Měrná plošná odpařivost	$[kg_w \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}]$	2,86
Měrná objemová odpařivost	$[kg_w \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}]$	32,59
Energetická náročnost sušení	$[kJ \cdot kg_w^{-1}]$	4 250
Účinnost sušení	[%]	62,3

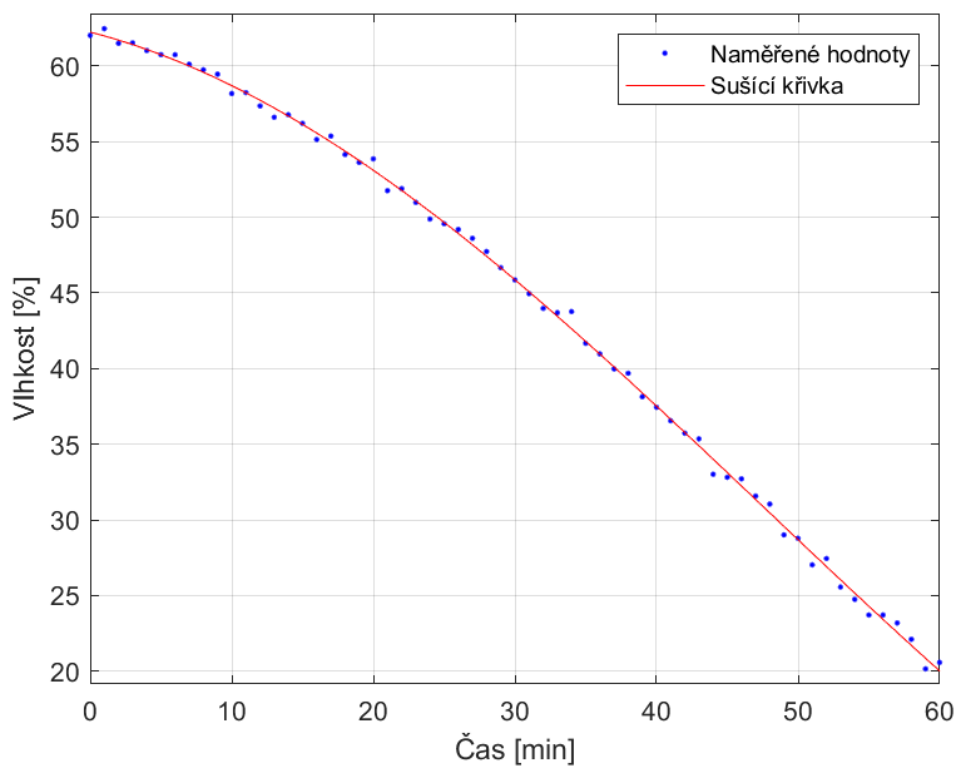
Tabulka 31: Výsledky měření XIX



Graf 42: Sušící křivka pro měření XIX

Měření XX		
Vstupní vlhkost	[%]	62,1
Výstupní vlhkost	[%]	17,1
Hmotnost biomasy na vstupu do sušky	[kg]	2,350
Hmotnost sušiny	[kg]	0,890
Hmotnost vody na vstupu	[kg]	1,460
Obsah vody na vstupu	[%]	62,0
Hmotnost biomasy na výstupu ze sušky	[kg]	1,110
Hmotnost nevysušené vody	[kg]	0,220
Hmotnost vysušené vody	[kg]	1,240
Dopočítaná vlhkost	[%]	19,8
Odchylka měření	[%]	-6,3
Měrná plošná odpařivost	$[kg_W \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}]$	1,54
Měrná objemová odpařivost	$[kg_W \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}]$	24,09
Energetická náročnost sušení	$[kJ \cdot kg_W^{-1}]$	4 200
Účinnost sušení	[%]	63,8

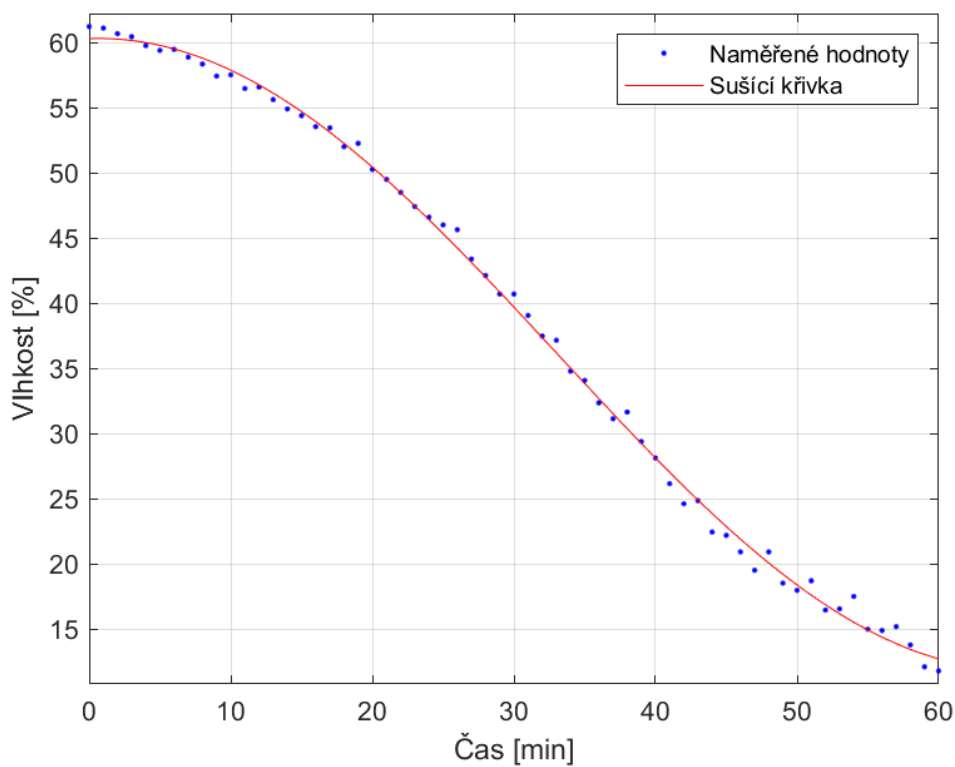
Tabulka 32: Výsledky měření XX



Graf 43: Sušící křivka pro měření XX

Měření XXI		
Vstupní vlhkost	[%]	61,2
Výstupní vlhkost	[%]	2,1
Hmotnost biomasy na vstupu do sušky	[kg]	1,870
Hmotnost sušiny	[kg]	0,726
Hmotnost vody na vstupu	[kg]	1,144
Obsah vody na vstupu	[%]	61,2
Hmotnost biomasy na výstupu ze sušky	[kg]	0,832
Hmotnost nevysušené vody	[kg]	0,106
Hmotnost vysušené vody	[kg]	1,038
Dopočítaná vlhkost	[%]	12,8
Odchylka měření	[%]	-18,1
Měrná plošná odpařivost	$[kg_W \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}]$	1,29
Měrná objemová odpařivost	$[kg_W \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}]$	20,17
Energetická náročnost sušení	$[kJ \cdot kg_W^{-1}]$	4 100
Účinnost sušení	[%]	63,6

Tabulka 33: Výsledky měření XXI



Graf 44: Sušící křivka pro měření XXI

Seznam obrázků

Obrázek 1: Voda v biomase; převzato z [6].....	16
Obrázek 2: Statika sušení.....	21
Obrázek 3: Komorová sušárna, převzato z [12].....	26
Obrázek 4: Pásová sušárna, převzato z [13].....	26
Obrázek 5: Bubnová sušárna s příklady možných vestaveb, převzato z [14].....	27
Obrázek 6: Proudová sušárna, převzato z [12].....	28
Obrázek 7: Fluidní sušárna, převzato z [15].....	29
Obrázek 8: Válcové sušárny, převzato z [12].....	29
Obrázek 9: Lopatková sušárna, převzato z [14].....	30
Obrázek 10: Kontaktní sušárna ústavu energetiky ČVUT.....	44
Obrázek 11: Čelní pohled do prostoru sušárny s vyjmutým míchadlem.....	44
Obrázek 12: Keramické misky se vzorky (vlhká štěpka).....	44
Obrázek 13: Laboratorní pec.....	45
Obrázek 14: Sušený materiál – krmné granule.....	45
Obrázek 15: Sušený materiál – mulčovací kůra.....	45
Obrázek 16: Sušený materiál – dřevní štěpka, skladování venku.....	46
Obrázek 17: Dřevní štěpka, drcená.....	46
Obrázek 18: Dřevní štěpka, rozdíl mezi vlhkou (nahore) a suchou (dole).....	46

Seznam grafů

Graf 1: Závislost výhřevnosti na vlhkosti	15
Graf 2: Závislost měrné vlhkosti materiálu na relativní vlhkosti vzduchu; převzato z [9]	17
Graf 3: Závislost teploty varu vody na tlaku.....	19
Graf 4: Vliv tlaku na latentní teplo vypařování.....	20
Graf 5: Sušící křivka, převzato z [10]	22
Graf 6: Ukázka průběhu teplot během sušení	51
Graf 7: Sušící křivka pro měření XVII	52
Graf 8: Sušící křivky pro materiál – krmné granule.....	56
Graf 9: Sušící křivky pro materiál – mulčovací kůra.....	56
Graf 10: Sušící křivky pro materiál – dřevní štěpka	57
Graf 11: Porovnání vlivu zaplnění pro měření dřevní štěpky	57
Graf 12: Porovnání vlivu teploty otopu pro měření dřevní štěpky.....	58
Graf 13: Porovnání vlivu velikosti materiálu pro měření dřevní štěpky	58
Graf 14: Srovnání sušících křivek získaných z experimentu a z teorie pro měření XVII.....	64
Graf 15: Vliv zaplnění sušky na měrnou plošnou odpařivost a dobu sušení (IV).....	66
Graf 16: Vliv teploty ohřevu na měrnou plošnou odpařivost a dobu sušení (IV).....	66
Graf 17: Vliv velikosti materiálu na měrnou plošnou odpařivost a dobu sušení (IV)	67
Graf 18: Vliv sypné hustoty materiálu na měrnou plošnou odpařivost a dobu sušení (IV)	67
Graf 19: Vliv tepelné vodivosti materiálu na měrnou plošnou odpařivost a dobu sušení (IV)...	68
Graf 20: Vliv otáček míchadla na měrnou plošnou odpařivost a dobu sušení (IV)	68
Graf 21: Vliv zaplnění sušky na měrnou plošnou odpařivost a dobu sušení (XVIII)	69
Graf 22: Vliv teploty ohřevu na měrnou plošnou odpařivost a dobu sušení (XVIII).....	69
Graf 23: Vliv velikosti materiálu na měrnou plošnou odpařivost a dobu sušení (XVIII).....	70
Graf 24: Sušící křivka pro měření I.....	74
Graf 25: Sušící křivka pro měření II	75
Graf 26: Sušící křivka pro měření III.....	76
Graf 27: Sušící křivka pro měření IV	77
Graf 28: Sušící křivka pro měření V	78
Graf 29: Sušící křivka pro měření VI.....	79
Graf 30: Sušící křivka pro měření VII	80
Graf 31: Sušící křivka pro měření VIII	81
Graf 32: Sušící křivka pro měření IX.....	82
Graf 33: Sušící křivka pro měření X	83
Graf 34: Sušící křivka pro měření XI.....	84

Graf 35: Sušící křivka pro měření XII	85
Graf 36: Sušící křivka pro měření XIII	86
Graf 37: Sušící křivka pro měření XIV	87
Graf 38: Sušící křivka pro měření XV	88
Graf 39: Sušící křivka pro měření XVI.....	89
Graf 40: Sušící křivka pro měření XVII	90
Graf 41: Sušící křivka pro měření XVIII	91
Graf 42: Sušící křivka pro měření XIX.....	92
Graf 43: Sušící křivka pro měření XX	93
Graf 44: Sušící křivka pro měření XXI.....	94

Seznam tabulek

Tabulka 1: Porovnání typů sušáren	31
Tabulka 2: Spotřeba energie různých druhů sušek.....	32
Tabulka 3: Hodnoty C a x pro různé typy sušáren.....	35
Tabulka 4: Seznam měření.....	47
Tabulka 5: Rozměrové charakteristiky sušárny	48
Tabulka 6: Měření obsahu vody ve vzorcích	49
Tabulka 7: Bilance materiálu na vstupu.....	49
Tabulka 8: Bilance materiálu na výstupu.....	50
Tabulka 9: Ukázka záznamu hodnot z měřicí stanice	51
Tabulka 10: Souhrnné výsledky všech měření.....	55
Tabulka 11: Určené / odhadované parametry materiálu	62
Tabulka 12: Porovnání výsledků experimentálních měření a teoretických výpočtů.....	63
Tabulka 13: Výsledky měření I.....	74
Tabulka 14: Výsledky měření II	75
Tabulka 15: Výsledky měření III	76
Tabulka 16: Výsledky měření IV	77
Tabulka 17: Výsledky měření V	78
Tabulka 18: Výsledky měření VI.....	79
Tabulka 19: Výsledky měření VII.....	80
Tabulka 20: Výsledky měření VIII	81
Tabulka 21: Výsledky měření IX.....	82
Tabulka 22: Výsledky měření X	83
Tabulka 23: Výsledky měření XI.....	84
Tabulka 24: Výsledky měření XII.....	85
Tabulka 25: Výsledky měření XIII	86
Tabulka 26: Výsledky měření XIV	87
Tabulka 27: Výsledky měření XV	88
Tabulka 28: Výsledky měření XVI	89
Tabulka 29: Výsledky měření XVII.....	90
Tabulka 30: Výsledky měření XVIII	91
Tabulka 31: Výsledky měření XIX	92
Tabulka 32: Výsledky měření XX	93
Tabulka 33: Výsledky měření XXI	94