

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**ZÁVĚREČNÁ
PRÁCE**

2019

Bc. Vojtěch Dlouhý

Čestné prohlášení

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Praze, 12. června 2019

.....

Bc. Vojtěch Dlouhý

Anotační list

Jméno autora Bc. Vojtěch Dlouhý
Název BP/DP Sušení krmných granulí
Anglický název: Drying of feed pellets
Akademický rok: 2018/2019
Ústav/Obor: Ústav energetiky/Energetika
Vedoucí BP/DP: doc. Ing. Tomáš Dlouhý CSc.

Konzultant:

Bibliografické údaje: Počet stran: 81
Počet obrázků: 28
Počet tabulek: 23
Počet příloh: 1

Klíčová slova: sušení, typy sušení krmných směsí, vakuová technika

Keyword: drying, types of compound feed drying, vacuum technology

Anotace: Tato práce se zabývá procesem sušení krmných směsí. Uvádí různé typy sušáren a vakuové techniky. V práci jsou porovnány dva typy měření. Jedno měření je prováděno na atmosférické sušárně, druhé na sušárně, jenž je vybavena vývěvou pro tvorbu vakua. Vyhodnocení výsledků měření je v závěrečné části práce.

Abstract: This work deals with the process of drying of feed mixtures. It lists various types of dryers and vacuum technology. Two types of measurements are compared. One measurement is carried out on an atmospheric oven, the other on an oven equipped with a vacuum pump. Evaluation of the measurement results is in the final part of the thesis.

Bibliografická citace

DLOUHÝ, Vojtěch Bc. *Sušení krmných granulí*. Praha, 2019. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav Energetiky. Vedoucí práce doc. Ing. Tomáš Dlouhý CSc.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Tomáši Dlouhému, CSc. za cenné rady, připomínky a přínosné konzultace v průběhu přípravy celé diplomové práce. Dále pak Ing. Janu Havlíkovi, Ph.D. a Ing. Michelu Sabatinimu za pomoc a rady při měření v laboratořích ČVUT v Praze. V neposlední řadě chci poděkovat své rodině za podporu po celou dobu studia.

Obsah

1. Úvod.....	10
2. Biomasa	11
2.1. Definice biomasy.....	11
2.2. Rozdělení biomasy	12
3. Sušení	13
3.1. Proces sušení	13
3.2. Počáteční období	13
3.2.1. I. období sušení.....	14
3.2.2. II. období sušení	14
3.3. Vazby vlhkosti v materiálu.....	15
3.4. Absorpce a desorpce.....	16
3.5. Statika sušení.....	17
3.6. Kinetika sušení	18
3.7. Doba sušení	19
3.8. Teplota sušícího média	20
3.9. Stupeň rozmělnění a tloušťka vrstvy (měrné zatížení).....	20
3.10. Vliv závislosti teploty varu vody na tlaku	20
4. Způsoby sušení rostlinných materiálů	22
4.1. Dělení sušáren	22
5. Konvektivní sušení	25
5.1. Pásová konvektivní sušárna s několika pásy	25
5.2. Fluidní sušárna	26
5.3. Rozprašovací sušárna	27
5.4. Lísková (skříňová) sušárna.....	29
5.5. Vakuová sušárna.....	30
6. Konduktivní (kontaktní) sušení	31
6.1. Bubnová sušárna.....	31
6.2. Lopatková sušárna.....	32
6.3. Sublimační sušárna.....	33
7. Vývěva.....	34
7.1. Dělení vývěv podle principu činnosti.....	34
7.2. Dělení vývěv podle stupně vakua.....	34
7.3. Příklady konstrukcí vývěv	35
8. Typy vývěv.....	38
8.1. Olejové rotační vývěvy.....	38
8.2. Grafitové vývěvy	39

8.3.	Vodokružné vývěvy	40
8.3.1.	Kompaktní vodokružné vývěvy	40
8.3.2.	Univerzální vodokružné vývěvy.....	41
8.3.3.	Jednostupňové vodokružné vývěvy.....	41
8.3.4.	Dvoustupňové vodokružné vývěvy	42
8.3.5.	Velkoobjemové vodokružné vývěvy.....	42
8.4.	Zobákové vývěvy	43
8.5.	Šroubové vývěvy.....	44
8.6.	Pístové vývěvy	44
8.7.	Rootsovy vývěvy	45
8.8.	Dvoustupňové olejové vývěvy	46
9.	Experimentální část	48
9.1.	Atmosférické sušení	48
9.1.1.	Postup sušení materiálu	50
9.1.2.	Typy měření	51
9.1.3.	Křivka sušení.....	51
9.1.4.	Výsledky měření.....	52
9.1.5.	Vyhodnocení měření atmosférického sušení.....	53
9.2.	Vakuové sušení.....	54
9.2.1.	Typy měření	55
9.2.2.	Sušící křivka	56
9.2.3.	Další výsledky měření	57
9.2.4.	Vyhodnocení měření vakuového sušení	57
9.3.	Porovnání sušících křivek.....	58
9.3.1.	Porovnání dle stejné teploty otopu $t=110\text{ }^{\circ}\text{C}$ a zaplnění 15 %.....	58
9.3.2.	Porovnání dle stejné teploty otopu $t=130\text{ }^{\circ}\text{C}$ a zaplnění 15 %.....	59
9.3.3.	Porovnání dle stejného zaplnění 45 %.....	59
9.3.4.	Porovnání dle stejného zaplnění 15 %.....	60
9.3.5.	Porovnání dle stejného $\Delta t= 39-40\text{ }^{\circ}\text{C}$	61
9.3.6.	Porovnání dle stejného $\Delta t= 23,8-26\text{ }^{\circ}\text{C}$	62
9.3.7.	Porovnání dle stejného $\Delta t= 34-37\text{ }^{\circ}\text{C}$	63
9.4.	Vyhodnocení výsledků měření	64
9.4.1.	Závislost teploty materiálu na teplotě otopu a teplotě sytosti.....	64
9.4.2.	Závislost měrné odpařivosti plošné na zaplnění při konstantním tlaku.....	68
9.4.3.	Závislost měrné odpařivosti plošné na Δt (sytost) při konst. zaplnění sušárny 15 %....	70
9.4.4.	Závislost množství vysušeného materiálu na zaplnění sušárny.....	72
10.	Závěr.....	74

Seznam použité literatury:.....	75
Příloha 1	77

Seznam použitých symbolů

d	Vnitřní průměr sušárny	[m]
l	Délka sušárny	[m]
$h_{A0,1}$	Entalpie vzduchu vstup/výstup	[kJ/kg]
$h_{S0,1}$	Entalpie sušeného materiálu vstup/výstup	[kJ/kg]
m_{H_2O}	Množství vodní páry	[kg]
m_S	Množství vzduchu	[kg]
M_A	Hmotnostní tok suchého vzduchu	[kg/h]
M_S	Hmotnostní tok sušeného materiálu	[kg/h]
Q	Hmotnostní průtok	[kg/h]
r	Vnitřní poloměr sušárny	[m]
S_{pl}	Teplo-směnná plocha sušárny	[m ²]
V	Objem válce sušárny	[m ³]
\dot{W}	Úhrnné teplo dodané	[kJ/h]
$X_{A0,1}$	Měrná vlhkost vzduchu vstup/výstup	[kg/kg]
X_k	Kritická vlhkost	[kg/kg]
X_R	Zbytková vlhkost	[kg/kg]
X_S	Měrná vlhkost materiálu	[kg/kg]
X_S^*	Bezrozměrná vlhkost	[-]
$X_{S0,1}$	Měrná vlhkost sušeného materiálu vstup/výstup	[kg/kg]
ω	Relativní vlhkost	[%]

1. Úvod

Proces sušení je v současné době velmi často využíván v celé řadě odvětví. Uplatnění nachází například ve stavebnictví, zemědělství, strojírenství, energetice, potravinářském a farmaceutickém průmyslu.

Mezi nejrozšířenější způsoby sušení patří sušení konvekční, které je založeno na kontaktu sušeného materiálu, jenž obsahuje vodu, a proudícího sušícího média uvnitř sušárny. Dalším rozšířeným způsobem sušení je sušení kontaktní, při kterém dochází k vysoušení sušeného materiálu díky kontaktu s otápným povrchem sušárny. Dalšími technologiemi jsou například mikrovlnné a radiační sušení.

Tato práce se bude zabývat typy sušáren, a to jak konvektivních, tak kontaktních. Bude vysvětlena teorie sušení v konvektivních a kontaktních sušárnách, a také bude vytvořen přehled vakuové techniky. Vakuová technika je důležitá s ohledem na sušení krmných směsí, jelikož snížením tlaku jsme schopni lépe regulovat sušící proces. Pro zvládnutí sušícího procesu je nutné znát nejen teorii, ale je nutné mít také praktické zkušenosti. Například u prostupu tepla je obtížné fyzikálně popsat tento děj, a proto se provádí experimenty, aby se stanovily průběhy těchto fyzikálních jevů pro dané podmínky.

Cílem práce je porovnání energetické náročnosti sušení krmných směsí při různých podmínkách a způsobu zapojení sušárny. Měnicími podmínkami budou teplota otopu sušárny, zaplnění sušárny, vlhkost materiálu. Experimenty s měnicími se podmínkami proběhnou na sušárně, která bude zapojena jako atmosférická a vakuová. Dalším cílem bude doporučení nejvhodnějšího způsobu sušení krmných směsí.

2. Biomasa [2], [3]

2.1. Definice biomasy

V dnešní době již existuje spousta definic biomasy. Pojmem biomasa můžeme označit těla a zbytky všech organismů. Tím jsou myšleny bakterie, rostliny, houby, sinice, ale také živočichové. Lze sem také zařadit veškerou organickou hmotu, která se účastní látkových přeměn na zemi. Biomasa je považována za obnovitelný zdroj energie a jako taková je brána pouze jako materiál, který vznikl činností rostlin a živočichů. Naproti biomase stojí fosilní paliva. Ta jsou sice také z biologického materiálu, ale naakumulovaná energie je řadí do neobnovitelných zdrojů energie. V legislativě můžeme najít celou řadu definic biomasy. Tyto definice se liší podle účelu, pro který je biomasa používána. Níže vypracovaný seznam vychází z české legislativy (zákon č.180/2005, vyhláška č. 502/2005 Sb., a vyhláška č. 482/2005 Sb.) a obsahuje ucelený výčet definic biomasy jako:

- a) rostlinná hmota, a to včetně zbytků rostlin, produktů z výroby a zpracování,
- b) další tuhá, kapalná i plynná paliva, která jsou výhradně vyráběna z rostlin či jejich částí; nezahrnuje se zde rašelina a další rostliny uvedené ve vyhlášce č. 485/2005 Sb.,
- c) zemědělské meziprodukty vznikající v živočišné výrobě, čímž je myšlen chov zvířat a jejich exkrementy,
- d) biopaliva v plynné a kapalně formě, která jsou vyrobena termickým zplynováním, pyrolýzou nebo jinými procesy; zahrnují se zde všechny meziprodukty a produkty, které lze použít jako palivo,
- e) alkoholy, které se vyrábějí z biomasy, s vyloučením dřeva,
- f) biopalivo, které lze získat z biologicky rozložitelného odpadu; zahrnuje také kaly z čistíren odpadních vod, či z papírenského průmyslu,
- g) papír, karton či lepenku, které již nemohou být využity, a z těchto materiálů vytvořené pelety či brikety,
- h) neošetřené dřevo, které je bráno jako palivové, či už bylo použito,
- i) biologicky rozložitelný komunální odpad, který prošel tříděním, a biomasa, kterou získáme vyráběním bioplynu anaerobní digescí,
- j) živočišná hmota či další živočišné produkty, které již nejsou vhodné k lidské spotřebě, pokud je tato hmota využita na výrobu bioplynu anaerobní digescí,
- k) biologicky nevytríděný rozložitelný odpad, který se přemění při skladovacích procesech na bioplyn.

2.2. Rozdělení biomasy:

V kapitole 3.1 jsem uvedl několik různých druhů biomasy rozdělených z pohledu legislativy.

Pokud budu chtít rozdělit jednotlivé druhy do samostatných kategorií, nabízí se celá řada parametrů, podle kterých můžeme provést rozdělení.

Základní rozdělení veškeré biomasy lze určit jednoduchou klasifikací. Ta v sobě zahrnuje veškeré druhy, které můžeme dle legislativy považovat za biomasu:

- dendromasa (dřevní biomasa)
- fyto-masa (biomasa rostlinného původu a zemědělská biomasa)
- biomasa živočišného původu
- biologicky rozložitelný odpad.

Rozdělit biomasu lze také podle obsahu vody:

- **suchá biomasa** – hlavní složkou je dřevo, dřevní odpady a sláma; tuto biomasu lze spalovat přímo nebo po vysušení,
- **mokrý biomasa** – především odpady, které pocházejí z živočišné výroby, například kejda či tekoucí komunální odpad; využívá se v bioplynových stanicích.
- **speciální biomasa** – biomasa, která pochází z různých plodin, například škrobových a cukernatých plodin; vyrábí se z ní líh nebo bionafta.

3. Sušení [4]

Pokud se řekne pojem sušení, tak nejčastější představou o tomto procesu bývá odstraňování vlhkosti z vlhkého materiálu s využitím různých metod. Vlhkostí bývá nejčastěji označovaná voda obsažená v materiálu, sušícím médiem při konduktivním sušení bývá nejčastěji vzduch nebo spaliny a při konvektivním sušení se pro sušení využívá plocha, přes kterou je předáváno teplo. Při sušení roztoků se nejčastěji využívá sušení pomocí rozstříkovaní kapek do proudu sušícího média. Zde dochází k odstraňování nežádoucí vody odpařováním. Pokud se rozhodneme sušit mokré dřevo, papír či textil, jsme schopni sušit materiál pouze zahříváním materiálu bez přítomnosti sušícího média. Pro tyto materiály lze při snaze o snížení vlhkosti využít i lisování, ale to nebývá považováno za sušení. Nejčastěji se při sušení kombinují různé varianty, např. u sušení mléka dochází nejprve k odparu kapaliny, přičemž dochází k zahuštění mléka, následně je zahuštěné mléko rozprašeno v rozprašovacích sušárnách. Po tomto procesu sušení vzniká finální vysušený produkt.

Nejčastěji se sušení používá ke snižování hmotnosti či pro změny vlastností materiálu, kterými mohou být zvýšení výhřevnosti, konzervace potravin a krmiv či zpevnění keramických výrobků. Sušení se využívá také pro snižování objemu sušeného materiálu, a to jak z pohledu uskladnění, tak také z pohledu dopravy materiálu. Sušení probíhá v sušárnách, kterých máme mnoho typů. Některé typy sušáren si popíšeme v kapitolách 6,7,8.

3.1. Proces sušení [9]

V této kapitole bude popsán průběh sušícího procesu, kde je jako sušící médium používán sušící vzduch v konvekční sušárně. Dle prvotních předpokladů lze na vstupu do sušárny uvažovat sušený materiál, který má vnitřní vlhkost. Důležitými hodnotami jsou vlhkost materiálu a teplota vlhkého materiálu. Při uvedení sušeného materiálu do kontaktu se sušícím médiem, které má rozdílnou teplotu, nastává proces sušení. Tento proces dělíme na tři části.

3.2. Počáteční období

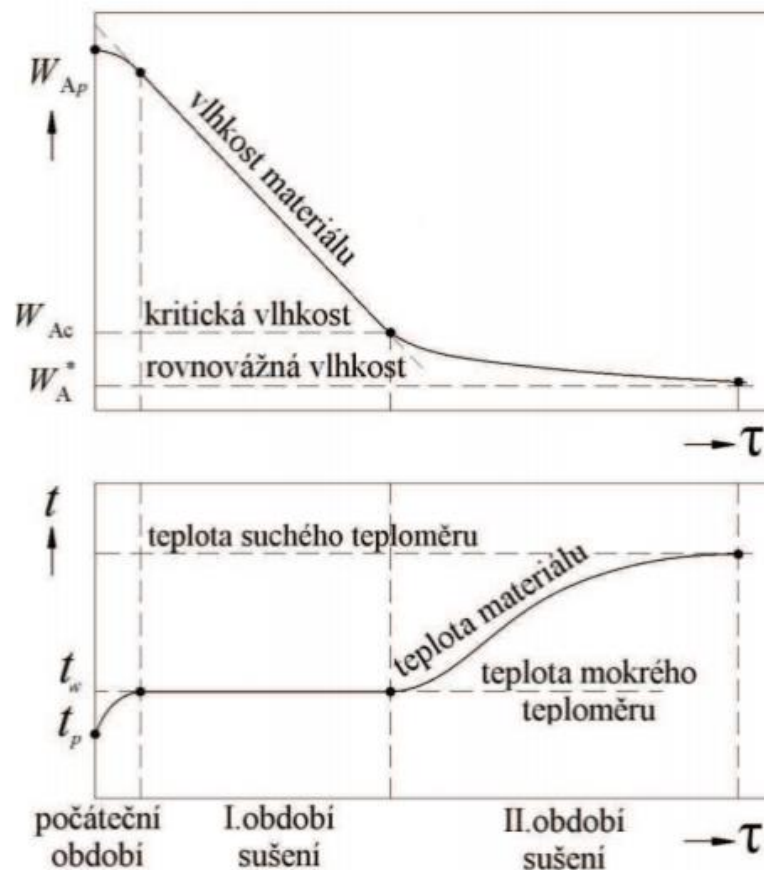
Během tohoto časového období dochází k ohřívání materiálu z teploty vlhkého materiálu na teplotu vlhkého teploměru. Během ohřevu dochází k postupnému odpařování vody z materiálu. Pro ohřev je nutné spotřebovávat teplo, jenž je dodávané sušícím médiem. Díky tomuto jevu se snižuje rychlost ohřevu sušeného materiálu. Toto počáteční období sušení bývá relativně krátké a někdy jej lze obtížně zaznamenat.

3.2.1. I. období sušení

Pokud sušený materiál projde počátečním obdobím, dostane se do I. sušícího období. Zde teplota materiálu dosahuje hodnoty teploty vlhkého teploměru a již nedochází ke změně teploty. Důvodem je využití veškerého dodávaného tepla sušícím médiem pro odpařování vody, jenž je v sušeném materiálu. Rychlost sušení se v tomto období nemění a lze ji tedy považovat za konstantní. Rychlost sušení závisí na vlhkosti, teplotě a hmotnostním průtoku sušícího média.

3.2.2. II. období sušení

Sušený materiál, který projde I. období sušení, již nemá vodu na svém povrchu a pevné částice se tak dostávají do kontaktu se sušícím médiem. Díky tomuto kontaktu je materiál dále ohříván na teplotu vyšší, než je teplota mokrého teploměru. Dochází zde ale ke zpomalování sdílení tepla i hmoty, a to do doby, než materiál dosáhne stejných parametrů jako má sušící médium, hlavně stejné vlhkosti a teploty. Pokud tento jev nastane, proces sušení se zastaví a sušený materiál již nejde více vysoušet.



Graf 1: Průběh sušení (převzato z [9])

3.3. Vazby vlhkosti v materiálu [8]

Hlavní složkou rostlinných buněk je voda. Její podíl bývá v rozmezí od 75 % do 90 %. Pro procesy sušení je nejdůležitější vazba vody uvnitř sušeného materiálu. Rozlišujeme dva druhy vlhkosti – volná a vázaná.

Volná vlhkost se nijak nespojuje s molekulami sušeného materiálu. Nic jí nebrání v pohybu buňkami uvnitř materiálu. Hlavní využití nachází v dodávání živin a udržení optimální funkce buněk. Při sušení se udává volná vlhkost jako nejobjemnější část vody v materiálu. Lze ji najít na povrchu sušeného materiálu, uvnitř velkých pórů a také v makrokapilárách. Odstranění volné vlhkosti dosáhneme nejčastěji sušením, ale velmi dobrých výsledků lze dosáhnout i při mechanickém odstraňování, kterým může být lisování či odstředění.

Vázaná vlhkost je tvořena vazbami vody s molekulami sušeného materiálu. Charakteristika vázané vlhkosti je skrz fyzikálně-chemické vlastnosti:

- téměř nerozpustné látky, jež jsou rozpustné ve volné vodě,
- měrná tep. kapacita na nižší úrovni, která se blíží měrnému teplu ledu,
- při silném mrazu dochází k zamrznání,
- vyšší hustota než u volné vody,
- neobsahuje rozpustné látky a tudíž neelektrovodivá.

Uvnitř materiálu se asi jen 5 % vody považuje za vázanou. Zbytek je brán za volnou vodu, což vysvětluje snadnější proces sušení ovoce či zeleniny s obsahem vody do 12–14 %, ale zároveň potíže s odstraněním zbytkové vlhkosti.

Dle Rebintera jsou formy provázání vlhkosti s materiálem klasifikovány ve třech skupinách: chemické, fyzikálně-chemické a mechanické. Chemická vazba je brána za nejodolnější. Při sušení materiálu je téměř nemožné odstranit chemicky vázanou vlhkost. Lze ji rozdělit na vlhkost vody ve formě hydroxylových iontů a vody, jenž se nachází uvnitř krystalických hydrátů. Fyzikálně-chemická vazba je mnohem méně stabilní než vazba chemická. Do této skupiny je zařazena absorpční a osmoticky vázaná vlhkost. Mechanická vazba je ze všech tří skupin nejslabší. Je udržována díky obsazení kapilár uvnitř materiálu a lze ji proto také nazývat kapilárně-vázaná vlhkost. Má téměř totožné vlastnosti jako volná vlhkost, a proto se při sušení materiálu odstraňuje jako první.

Pro určování obsahu vody v sušeném materiálu lze využívat následující vztahy, které jsou určovány pro chemicky vázanou vodu, jenž nelze tepelným způsobem odstranit:

Měrná vlhkost:

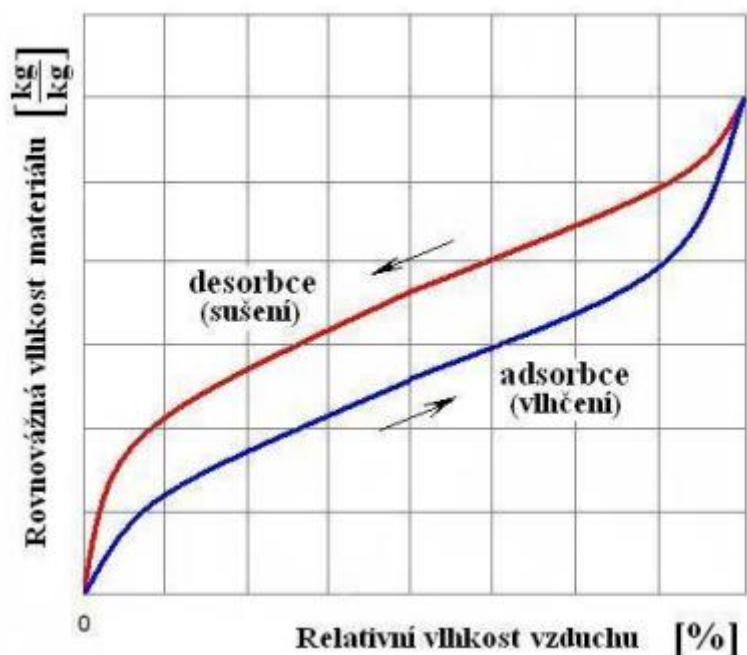
$$X_s = \frac{m_{H_2O}}{m_s} \quad (1)$$

Relativní vlhkost:

$$\omega = \frac{m_{H_2O}}{m_v} \quad (2)$$

3.4. Absorpce a desorpce [8]

Dle možností materiálu přijímat vlhkost z vnějšího prostředí můžeme materiály rozdělit na hyroskopické a nehyroskopické. Pokud je materiál schopen udržovat vlhkost, je to důležitá vlastnost pro sušení daného materiálu, která je charakterizována rovnovážnou vlhkostí. Tato hodnota je silně závislá na teplotě a vlhkosti prostředí, kde se nachází materiál. Pokud budeme uvažovat rovnovážnou vlhkost, znamená to, že tlak vodní páry nad materiálem je roven parciálnímu tlaku vodní páry v okolním prostředí. Při grafickém znázornění se vztah mezi obsahem rovnovážné vlhkosti materiálu a vlhkosti vzduchu při dané konstantní teplotě nazývá sorpční izotermou materiálu. Jestliže dojde k dosažení rovnovážného stavu adsorpcí z okolního prostředí, je možné získat adsorpční izotermu (vlhčení). Pokud je ale rovnováha dosažena odevzdáním vlhkosti z materiálu do okolního prostředí, získáváme tak desorpční izotermu (sušení).

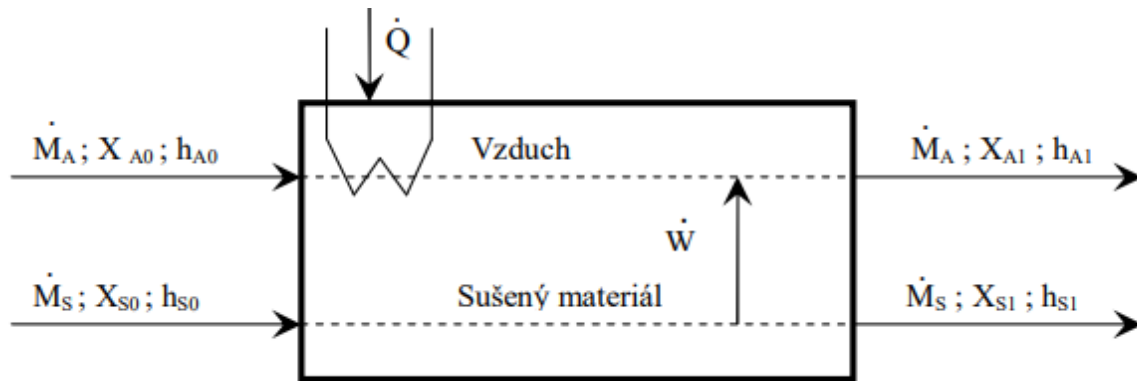


Graf 2: Adsorpční a desorpční izotermy [8]

Pokud sušíme potraviny, které mají hlavní složky sacharózu, škrob, pektin a celulózu, musíme uvažovat různé účinky na provázanost vlhkosti s materiálem. Rovnost hodnot rovnovážné a relativní vlhkosti při jedné teplotě je nejvyšší u pektinu, u kterého je i největší energie vazby. Mírně nižší hodnota je u škrobu a nejnižší je u sacharózy. Vlhkost tedy nejlépe váže pektin, následuje škrob, celulóza a na konec sacharóza. Obsah jednotlivých složek uvnitř materiálu má značný vliv na dobu trvání procesu sušení.

3.5. Statika sušení [8]

Jestliže známe parametry sušícího vzduchu na vstupu do sušárny, kterými jsou teplota, vlhkost a hmotnostní průtok, a parametry požadované výstupní vlhkosti sušeného materiálu, jsme schopni vypočítat parametry sušícího vzduchu, který odchází ze sušárny. Statika sušení se zakládá na hmotnostní a tepelné bilanci účinnosti sušení. Pro výpočty je nutné znát bilanční rovnice (3-5). Značný vliv na účinnost má směr proudění sušícího vzduchu. Proudění bývá řešeno jako souproudeé či protiproudeé.



Obr. 1: Balance sušárny (převzato z [8])

Látková bilance (vlhkost):

$$\dot{M}_A * X_{A0} + \dot{M}_S * X_{S0} = \dot{M}_A * X_{A1} + \dot{M}_S * X_{S1} \quad (3)$$

Hmotnostní průtok (celková odvedená vlhkost):

$$W = \dot{M}_A * (X_{A1} - X_{A0}) = \dot{M}_S * (X_{S0} - X_{S1}) \quad (4)$$

Energetická bilance:

$$Q = \dot{M}_A * (h_{A1} - h_{A0}) + \dot{M}_S * (h_{S1} - h_{S0}) \quad (5)$$

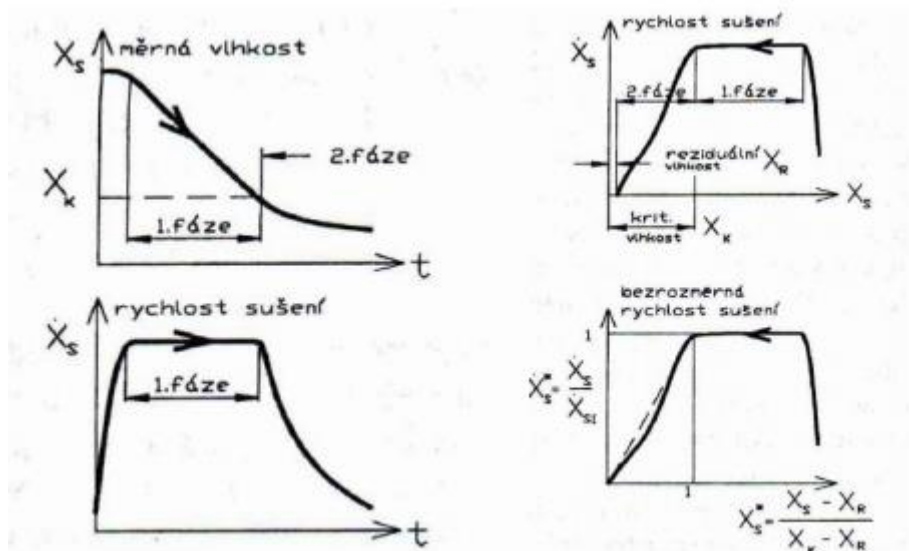
3.6. Kinetika sušení [6]

Kinetika sušení nám dává představu o tom, jak dlouho se bude sušený materiál sušit a jaké parametry bude mít sušárna, co se rozměrů týče. Pro každý typ sušárny je analýza vytvořena jinak. Analýzy jednotlivých sušáren se vytváří pomocí experimentů a experimentálních dat. Z těchto dat se následně sestavují sušící křivky pro jednotlivé typy sušáren.

Sušící křivka je graficky znázorněné vyhodnocení experimentálních dat získaných při sušení materiálu při konstantních parametrech prostředí, uvnitř kterého dochází k sušení. Sušící křivka je závislost měrné vlhkosti materiálu X_S na čase. Rychlost sušení \dot{X}_S lze brát jako zápornou vratnou časovou derivaci měrné vlhkosti. Pokud je při návrhu potřeba, lze vypočítat i bezrozměrnou vlhkost materiálu.

Bezrozměrná vlhkost materiálu:

$$X_S^* = \frac{X_S - X_R}{X_K - X_R}$$



Obr. 2: Sušící křivky (převzato z [6])

3.7. Doba sušení [8]

Nejdůležitějším parametrem pro návrh a výpočet sušárny je doba sušení. Je snaha o co nejintenzivnější zkracování doby sušení. Z ekonomického hlediska ale je nutné dodržet kvalitu sušení. Stanovit dobu sušení pomocí empirických vzorců je značně náročné, proto je potřeba použít velké množství opravných koeficientů, které zohledňují ve výpočtech jednotlivé vlivy na průběh sušení. Vlivy ovlivňující dobu sušení:

- Vlastnosti sušených látek – typ struktury a sazba vlhkosti,
- Tvar sušeného materiálu – rozměry částic, tloušťka sušeného materiálu,
- Vlhkosti – počáteční, konečná, kritická vlhkost,
- Kontakt sušeného materiálu se sušícím médiem,
- Parametry sušícího média – teplota, relativní vlhkost a rychlost proudění,
- Typ sušícího média,
- Maximální přípustná teplota sušeného materiálu – nejčastěji u potravin,
- Rovnoměrnost sušení,
- Typ sušárny.

3.8. Teplota sušícího média [8]

Pokud dochází při zahájení sušícího procesu ke zvyšování teploty sušícího média, lze očekávat zrychlení celého procesu sušení. Negativně se ale jeví tepelné ztráty, které se zvětšují a nejvyšších hodnot dosahují na konci procesu sušení, a to i kvůli tomu, že materiál již neobsahuje mnoho vlhkosti. Maximální teploty sušících médií závisí hlavně na vlastnostech sušeného materiálu a také na typu sušícího zařízení. Pokud je materiál sušen v pevné vrstvě, je v kontaktu se sušícím médiem spodní vrstva sušeného materiálu, což může vést k místním přehřátím, přičemž by maximální teplota neměla přesáhnout 75 °C.

3.9. Stupeň rozmělnění a tloušťka vrstvy (měrné zatížení) [8]

Jestliže chceme výrazně zkrátit dobu sušení, měli bychom sušený materiál rozmělnit. Nejčastěji se rozmělnění používá uvnitř rozprašovacích sušáren, kde je rozmělněný materiál vysušen během několika vteřin.

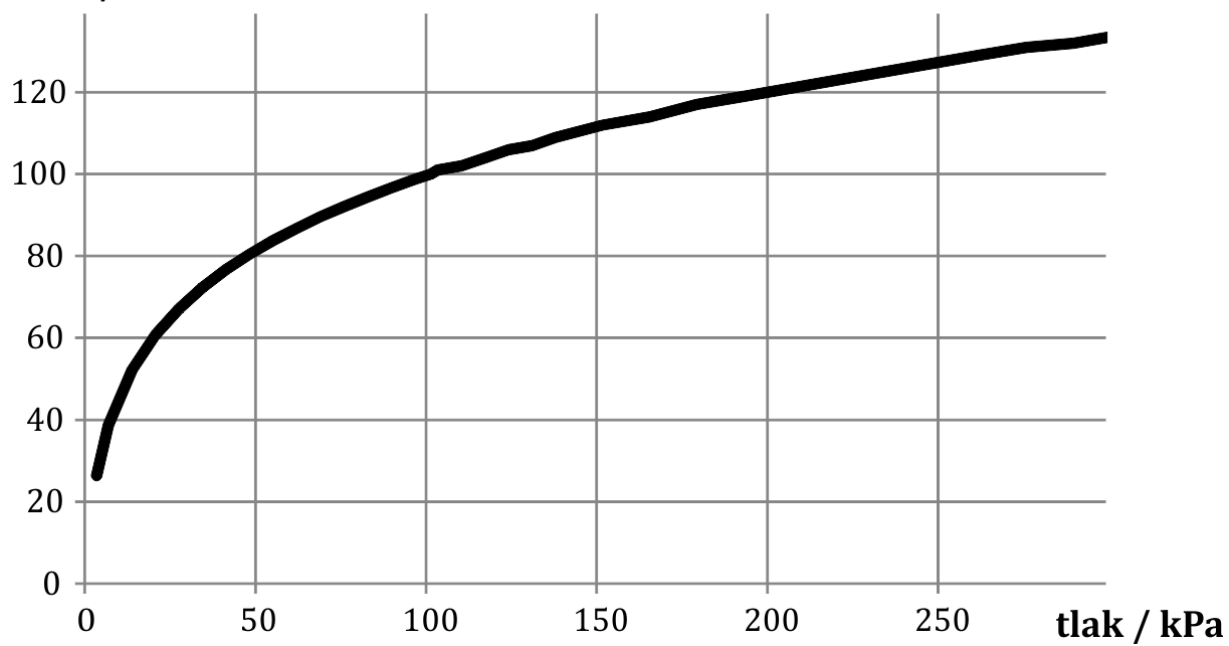
Tloušťka vrstvy sušícího materiálu silně ovlivňuje rychlost sušení. Pokud se tloušťka vrstvy materiálu zvětšuje, dochází ke zpomalení procesu sušení hlavně v první etapě. Během procesu sušení dochází ke zmenšování tloušťky vrstvy sušeného materiálu z důvodu úbytku odpařené vody a rychlost sušení se zvyšuje. Měrné zatížení má silný vliv na výkonnost sušícího zařízení. Při zvyšující se tloušťce sušeného materiálu dochází ke zvyšování sušícího výkonu, ale jen do chvíle, kdy se měrné zatížení materiálu dostane na svoji maximální hodnotu. Poté následuje pokles produktivity sušícího zařízení. Tloušťka vrstvy bývá určována pro každý materiál i typ sušárny zvlášť.

3.10. Vliv závislosti teploty varu vody na tlaku

Budeme-li sušit materiál, který je určen konzumaci, je nutné abychom během sušení nepřekročili maximální přípustnou teplotu materiálu. Tato teplota nám udává, na jakou teplotní úroveň se smíme během sušení dostat, aniž bychom narušili životnost živin uvnitř sušeného materiálu. Pro sušení potravin je tedy využíváno vakuové sušení. Na grafu 3 si můžeme vysvětlit, proč je u sušení potravin a krmných směsí výhodné sušit při podtlaku. Pokud sušení probíhá při atmosférickém tlaku 1 bar (100 kPa), bývá teplota varu vody rovna 100 °C. Při snižování tlaku dochází k poklesu bodu varu vody. Pokud nesmí teplota sušeného materiálu přesáhnout přesně danou hodnotu, musí dojít ke snížení tlaku v sušárně, aby se voda začala odpařovat při teplotě menší než 100 °C. Pro vytvoření vakua (podtlaku) se využívají vývěvy, jež jsou popsány v kapitole 3 a 4.

teplota
varu / °C

Závislost teploty varu vody na tlaku



Graf 3: Závislost teploty varu vody na tlaku [13]

4. Způsoby sušení rostlinných materiálů [8] [9]

Pro sušení rostlinných materiálů lze využít přirozený či uměle vytvořený způsob. Přirozený způsob sušení patří mezi nejstarší způsob pro odstraňování vlhkosti uvnitř hmoty. Na povrchu materiálu dochází k odpařování vody a vzniklá pára následně difunduje do okolního vzduchu. Energetická náročnost je v tomto případě téměř nulová. Pokud je tento způsob sušení využíván v průmyslu, ukazuje se jeho velká nevýhoda, kterou je pomalá rychlost sušení. Ta způsobuje potřebu velkých prostorů a ploch, na kterých bude sušení probíhat, a to zvyšuje jak investiční náklady, tak i náklady na manipulaci a dopravu. Lze tedy říci, že výhodnost přirozeného sušení s přihlédnutím k těmto okolnostem je sporná. Čím dál častěji je tedy využíván způsob umělého sušení, které probíhá v sušárnách. To jsou zařízení, ve kterých přívod vzduchu způsobí vypařování vlhkosti obsažené v materiálu.

4.1. Dělení sušáren [8]

4.1.1. Dle provozního režimu:

- kontinuální
- diskontinuální.

4.1.2. Dle provozního tlaku sušícího prostředí:

- atmosférické
- vakuové
- přetlakové.

4.1.3. Dle způsobu přívodu tepla:

- konvektivní – tepelná energie je přenášena prouděním
- konduktivní – tepelná energie je přenášena vedením
- radiační – tepelná energie je přenášena zářením
- vysokofrekvenční – tepelná energie je transformována z elektrické energie uvnitř materiálu
- akustické – tepelná energie vzniká díky ultrazvukovému kmitání
- kombinované – tepelná energie vzniká kombinací výše uvedených metod

4.1.4. Dle druhu sušícího média

- vzduch
- spaliny
- přehřátá pára
- inertní plyny

4.1.5. Dle cirkulace sušícího média:

- přirozená cirkulace
- nucená cirkulace

4.1.6. Dle počtu využití sušícího média

- sušárny bez recirkulace sušícího média
- sušárny s recirkulací sušícího média

4.1.7. Dle pohybu sušícího média a sušeného materiálu:

- polopohyblivé – pohybuje se buď sušený materiál, nebo sušící médium
- souproudové – sušený materiál i sušící médium mají stejný směr pohybu
- protiproudové – sušený materiál a sušící médium mají opačný směr pohybu
- křížoproudové – sušený materiál se pohybuje kolmo na směr sušícího média

4.1.8. Dle způsobu ohřevu sušícího média

- ohřev sluncem
- ohřev elektrinou
- ohřev parou
- ohřev spalovaným plynem
- ohřev spalovaným pevným či kapalným palivem

4.1.9. Dle konstrukce sušárny:

- komorové
- tunelové
- šachtové

- pásové
- bubnové
- válcové a jiné

4.1.10. Dle druhu sušeného materiálu:

- sušárny pro tuhé materiály
- sušárny pro tekuté materiály
- sušárny pro pastovité materiály

5. Konvektivní sušení [8] [9]

Jedním z nejpoužívanějších způsobů sušení je sušení konvektivní. V průmyslu se tento typ sušení využívá pro sušení ovoce, zeleniny, masa a dalších produktů. Pro sušení produktů se využívá přenosu tepla z ohřátého sušícího média. Nejčastěji se jako sušící médium používá vzduch či přehřátá pára, ale lze využívat i spaliny či inertní plyny. Základním předpokladem je vyšší teplota sušícího média, než je teplota sušeného materiálu. Tepelná energie, která je přiváděna do sušeného materiálu způsobuje odpařování vody a páry. Tato pára je odváděna sušícím médiem.

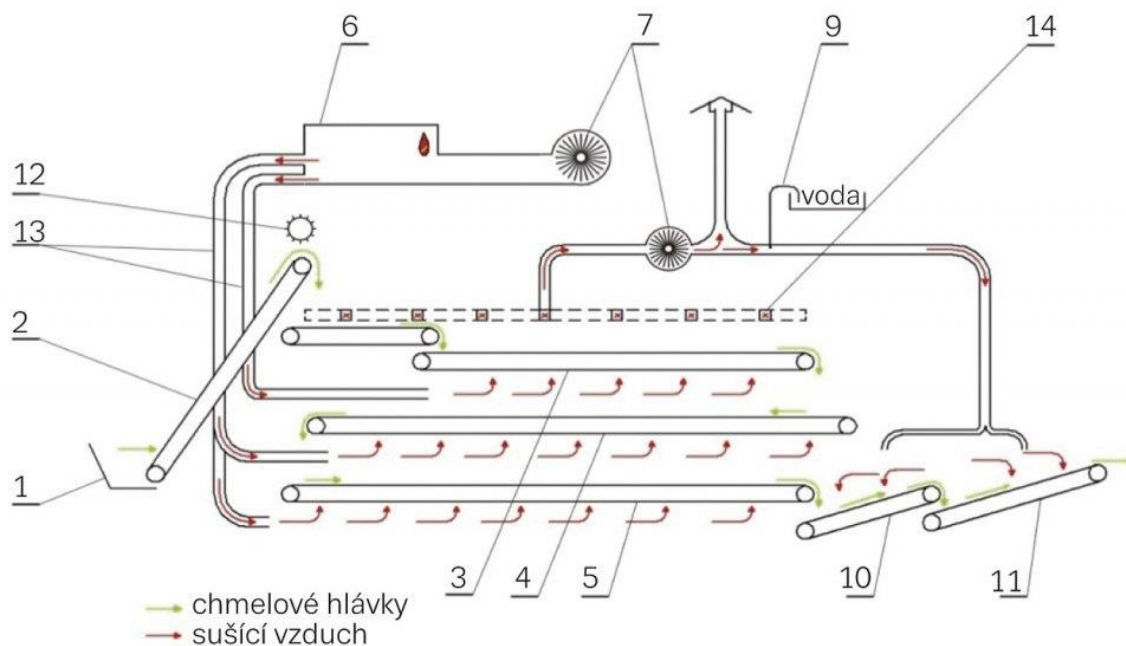
Při konvektivním sušení rozlišujeme sušení ve vrstvě, pro které probíhá v tunelových, komorových, šachtových či pásových sušárnách, dále pak rozlišujeme sušení s ofukem tryskami a sušení v částečném či plném vznosu, které je realizováno v bubnových, fluidních, vírových či rozprašovacích sušárnách.

Téměř všechny konvekční sušárny mají stejný způsob práce. Mají celkem jednoduchý tvar a nejsou příliš drahé. Tyto sušárny mají relativně vysokou specifickou spotřebu energie. Je to způsobeno ztrátami při sušení. Ztráty vznikají při ohřevu samotné sušárny a při úniku tepla do okolí. Efektivnost provozu ovšem záleží na typu a ceně použitého zdroje energie.

5.1. Pásová konvektivní sušárna s několika pásy [8]

Pásová sušárna s několika sušícími pásy je sestavena z nejčastěji ze 4 až 5 sušících pásů, které jsou umístěny nad sebou. Princip je takový, že na nejvyšší pás se přivádí sušený materiál a ten postupně přepadává na druhý pás, a tím dochází k promíchání materiálu a ke zkracování doby sušení. Takto se pokračuje na další pásy, než dojde k vysušení sušeného materiálu. Pásy, na kterých dochází k sušení, jsou nejčastěji z drátěného pletiva, pokud je sušen potravinářský materiál, tak bývají nerezové či plastové. Tloušťka sušící vrstvy je u těchto sušáren 75 až 150 mm.

Mezi výhody pásových sušáren patří kontinuální provoz. Lze řídit rychlost každého pásu a regulovat teploty nad každým pásem. Tyto sušárny jsou vhodné pro velké výkony a pro materiály s malým obsahem sušiny. Konstrukce těchto sušáren je velmi jednoduchá a pokud je sušárna konstruována jako závěsová, tak zvládá dělit materiál na granulát. Nevýhodami jsou vysoké provozní náklady a velká tlaková ztráta.



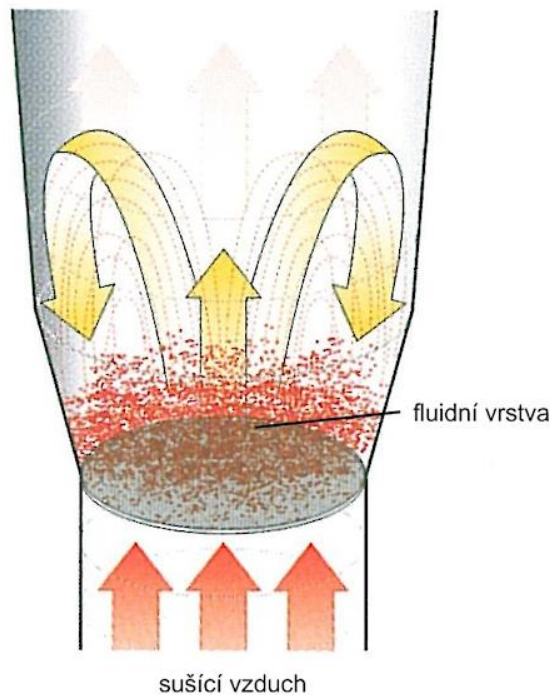
Obr. 3: Schéma vícepásové sušárny (převzato z [14])

5.2. Fluidní sušárna [8]

Tyto sušárny fungují na principu průchodu sušícího média ze spodu skrz vrstvu sušeného materiálu. Sušící médium má značnou rychlost, která zaručí, že se sušený materiál dostane do vznosu, ale neulétává. Rychlost proudění sušícího média nesmí tedy přesáhnout rychlost úletu částic sušeného materiálu. Díky intenzivnímu styku částic sušeného materiálu se sušícím vzduchem dochází ke zmenšování vzájemného tření a tím k lepšímu sušení. Pokud fluidní sušení probíhá v dopravním žlabu, sušený materiál se pohybuje po mírně nakloněné rovině a chová se jako tekutina.

Při využití vysokých teplot sušícího vzduchu je dosahováno intenzivnějšího odstranění zbytkové vlhkosti ze sušeného materiálu, a to kvůli transportu páry, která se nachází uvnitř částic sušeného materiálu. Díky této vlastnosti lze uvnitř fluidních sušáren vysoušet materiál, který má po sušení velmi nízkou zbytkovou vlhkost, a to i během velmi krátkého sušícího procesu. Pokud je materiál vysoce vysušen, je možné prodloužit dobu skladování vysušeného materiálu. Částice sušeného materiálu, které jsou sušeny za vysokých teplot, si udržují původní tvar i objem a mají porézní povrch, který je schopen rychle absorbovat vodu. Výhodami těchto sušáren jsou jednoduchost a velmi dobrý specifický výkon. Lze v nich sušit materiál s různým

stupněm vstupní vlhkosti a po sušení je získáván materiál s velmi dobrými vlastnostmi. Naopak nevýhodou jsou vyšší tlakové ztráty při sušení.



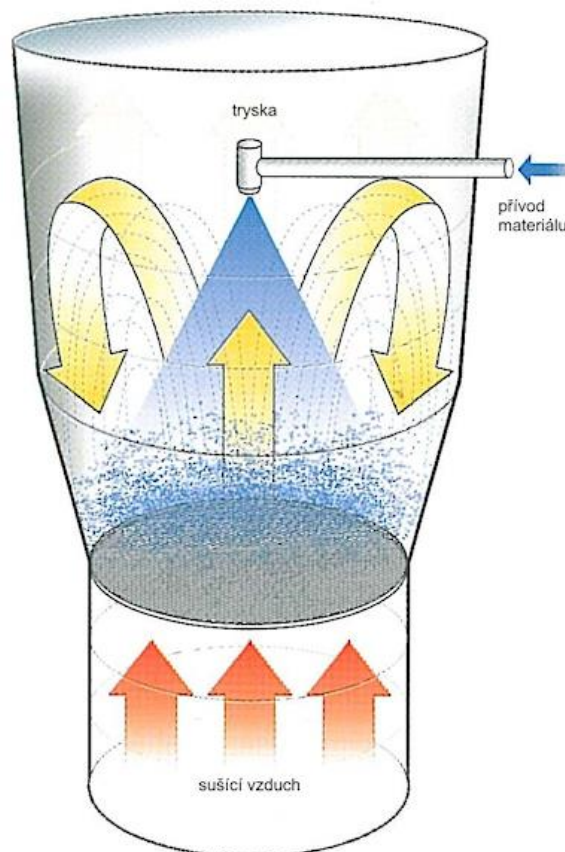
Obr. 4: Princip fluidní sušárny (převzato z [15])

5.3. Rozprašovací sušárna [8]

Tento typ sušáren se používá pro sušení materiálu v tekutém či kašovitém stavu. Základním úkolem rozprašovacích sušáren je potřeba rozdělit sušený materiál v sušící komoře na jemné kapičky. Dojde tak ke vzniku velkých styčných ploch a díky tomu trvá proces sušení jen několik sekund. Pokud při sušení dochází k vnitřní difúzi, tak se rychlost sušení téměř nezmění. Jelikož je plocha rozptýlených částic obrovská, dochází k odstraňování hlavně povrchové vlhkosti. Tento jev umožňuje u sušení výrobků citlivých na teplo používat zvýšenou teplotu pro sušení, a to až 200 °C.

Pro rozprašení kapaliny je možné využít několik způsobů. První možností je mechanické rozprašení. To je realizováno pomocí tlakové dýzy, kdy kapalina vstupuje obvykle pod nižším tlakem buď axiálně, či tangenciálně. Druhou možností je pneumatické rozprašení. To probíhá přidáváním dalšího média a je zde využíváno dvou základních dýz. Posledním způsobem je odstředivé rozprašení. V tomto případě kapalina natéká na rozprašovací kotouč, jenž má vysoké otáčky, a to až 350 ot/s.

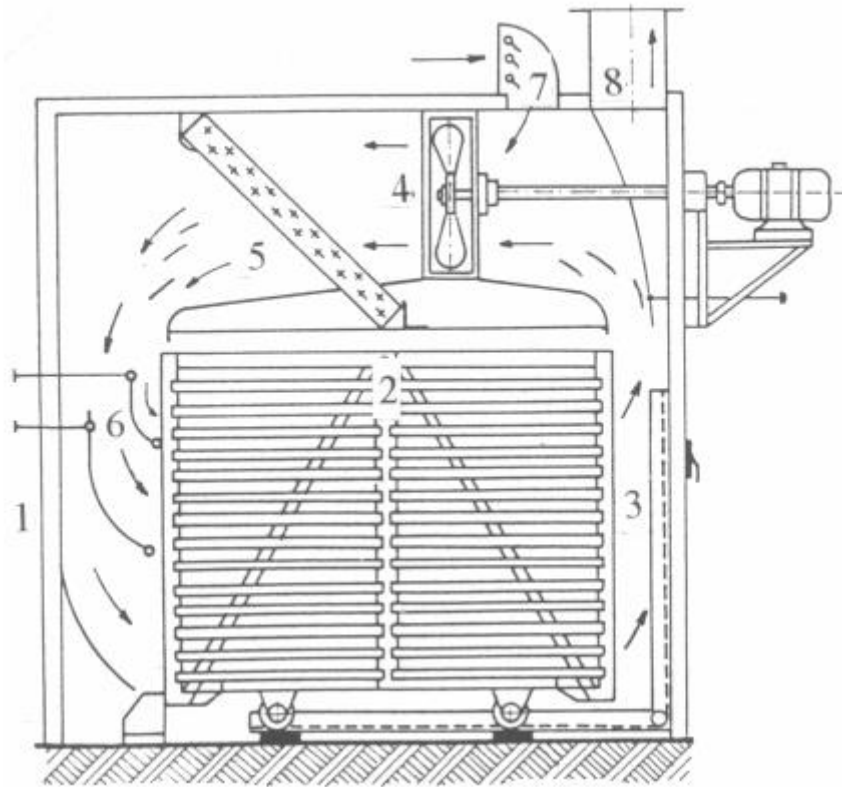
Výhodami rozprašovacích sušáren jsou velmi jednoduchá konstrukce a energeticky nenáročný provoz. Za nevýhodu může být považována možnost zanesení výstupních otvorů, které mají malý průřez. Pokud by bylo potřeba zvýšit výkon rozprašovacích sušáren, může dojít ke zhoršení kvality rozprašování. Tento negativní jev lze eliminovat zvýšením počtu trysek. Nejvíce rozšířeno je rozprašování pomocí kotouče, který má velkou rychlost otáčení (až 30 000 min^{-1}). Lze takto rozprašovat kapalný sušený materiál s obsahem sušiny až 50 %. Takové podmínky jsou vhodné pro sušárnu, která nemá specifikovaný výkon, a lze použít jeden rozprašovací kotouč. Nevýhodami rozprašovacích sušáren jsou vysoké náklady na zařízení, nutnost většího průměru sušící komory, jelikož zde dochází k širokému rozptylu kapiček sušeného materiálu. Materiál se v sušící komoře pohybuje buď souproutně, či protiproutně. Souproutý pohyb materiálu je využíván především u sušení materiálů citlivých na teplo, což má za následek možnost použití vyšších teplot bez problémů s přehřátím materiálu.



Obr. 5: Rozprašovací sušárna (převzato z [16])

5.4. Lísková (skříňová) sušárna [10]

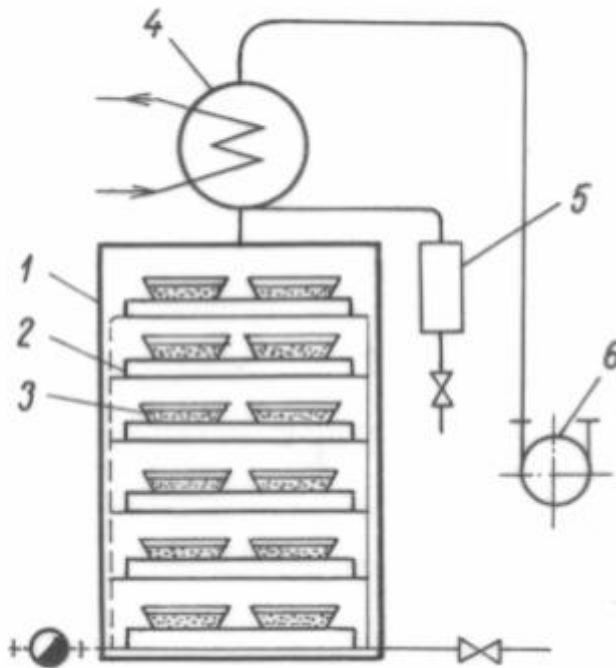
Tento typ sušárny pracuje na principu průchodu sušícího média skrz lísky se sušeným materiálem, který je uložen uvnitř sušící komory. Sušící médium je ohříváno během průchodu skrz topnou soustavu. Směs sušícího média a vzniklých par částečně obíhá uvnitř komory a zbytek odchází ze sušící komory. Poměr obíhajícího a odcházejícího sušícího média lze nastavit. Po dokončení sušícího procesu se lísky vyvezou ze sušárny a sušený materiál je nahrazen materiálem nevysušeným, což je časově značně náročné. V těchto sušárnách lze sušit téměř všechny materiály, je nutné ale počítat s dlouhou dobou sušení, a to až 50 hodin. Lískové sušárny se nejčastěji používají pro sušení malého množství materiálu, který má ovšem značnou hodnotu.



Obr. 6: Schéma lískové (skříňové) sušárny (převzato z [17])

5.5. Vakuová sušárna [10]

Vakuová sušárna pracuje na principu vsádkové sušárny s přímým i nepřímým ohřevem. Vakuová sušárna je tepelně zaizolovaná sušící komora, která může mít vyhřívaný povrch či topné police uvnitř sušící komory. Na tyto police se pokládají misky se sušeným materiálem, přičemž topné police jsou vyhřívány sušícím médiem. Vzniklá pára ze sušení je odsávána pomocí vývěvy a následně může být zkapalněna v kondenzátoru, či jí lze vypouštět do ovzduší. Uvnitř těchto sušáren bývá vysušován materiál velmi různorodé konzistence po menších dávkách. Díky vakuu zde sušení probíhá za nižších teplot než při atmosférickém tlaku a lze tedy sušit materiály, jenž potřebují nižší sušící teplotu, např. kvůli zachování vitamínů.



Obr. 7: Schéma vakuové sušárny (převzato z [17])

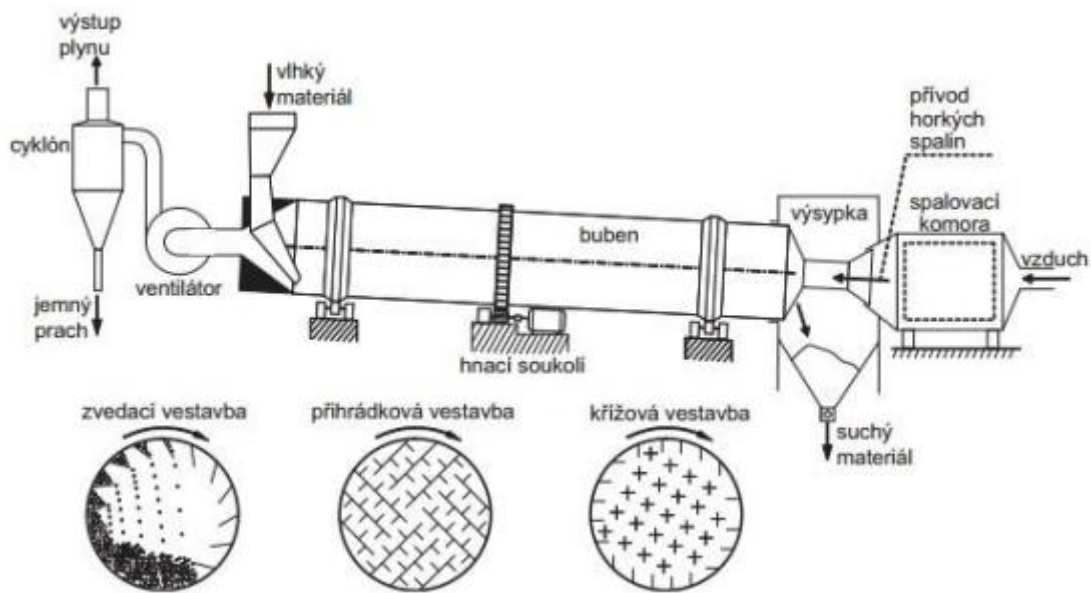
6. Konduktivní (kontaktní) sušení [5] [9]

Uvnitř zařízení, které funguje na principu konduktivního sušení, dochází k přenosu tepla pomocí přímého kontaktu sušeného materiálu s otápenou stěnou sušárny. Stěny sušárny jsou nejčastěji otápěny párou, nebo je otop zajištěn pomocí elektrické energie. V tomto typu sušáren je velmi malý tepelný odpor ve srovnání s konvektivními sušárnami. Hlavní úkol sušícího média spočívá v odvedení vlhkosti od sušeného materiálu. V těchto sušárnách lze během sušení využít i nízko potenciální teplo při použití podtlaku, a to i pokud má sušící médium vysokou relativní vlhkost. I tak lze dosáhnout dostatečného rozdílu parciálních tlaků vodní páry mezi povrchem sušeného materiálu a sušícího média.

6.1. Bubnová sušárna [9]

Hlavní součástí těchto sušáren je válec (buben), který má mírně nakloněnou rovinu. Je uložen na nosných a opěrných kladkách a otáčí se kolem vlastní osy, přičemž lze částečně měnit frekvenci otáčení bubnu. Dávkování sušeného materiálu je skrz otvor ve výše položeném konci bubnu a díky otáčení a vestavbě bubnu se sušený materiál pohybuje velmi složitým pohybem směrem ke spodnímu konci bubnu. Sušící médium prochází sušeným materiálem, přičemž sušení může trvat až 90 minut. Sušený materiál je buďto přímo sušen sušícím médiem, které odnáší vzniklou páru, nebo nepřímo, a tento způsob spočívá v zavádění dalšího média pro odvod vzniklé páry. Oba způsoby lze kombinovat. Pokud je bubnová sušárna konvekčního typu, je sušící vzduch, který projde bubnem, veden přes odlučovač, uvnitř kterého dojde k oddělení unášených částic sušeného materiálu. Sušící médium může skrz buben proudit jak v souproutém zapojení, tak i v protiproutém zapojení.

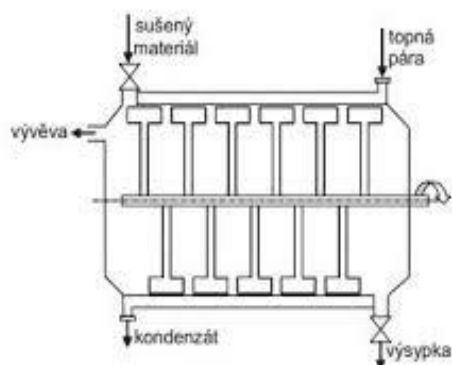
Uvnitř bubnových sušáren se nejčastěji suší sypké materiály, které při procesu sušení výrazně nemění svoje sypké vlastnosti. Pokud jsou v bubnu instalovány vestavby, je možné sušit i materiály, které jsou lepkavé a pastovité. Hmotnostní tok sušícího média je silně závislý na stupni prašnosti sušeného materiálu. Podle typu ohřívání sušícího média se určují teploty sušícího média na vstupu do bubnu. Je-li sušící médium ohříváno parou, může teplota dosáhnout až 180 °C, a pokud je sušící médium ohříváno kouřovými plyny, může teplota dosáhnout až 820 °C. Nejčastější rozměry bubnů bývají 1 až 3 m v průměru a obvodová rychlost bubnu je nejčastěji od 20 do 25 m*min⁻¹.



Obr. 8: Bubnová sušárna (převzato z [17])

6.2. Lopatková sušárna [9]

Tento typ sušárny má komoru tvarovanou jako válcový buben, přičemž osa je nejčastěji umístěna ve vodorovné poloze. Vnitřní plocha bubnu sušárny funguje jako výměník tepla a zároveň jako styková vyhřívaná kontaktní plocha. Uvnitř bubnu je v ose zařízení umístěna hřídel s lopatkami, které se při otáčení starají o promíchávání sušeného materiálu.



Obr. 9: Lopatková sušárna (převzato z [18])

6.3. Sublimační sušárna [9]

Hlavní částí této sušárny je hermeticky uzavřená komora tvaru válcového bubnu, která je tepelně izolovaná. Osa této sušárny je ve svislé poloze. Uvnitř sušárny jsou uloženy vytápěné police, které se nepohybují, a mezi těmito policemi jsou umístěny stěrky, které se využívají k mísení sušeného materiálu. Sušící médium je přiváděno do sušících polic a ty pak následně slouží jako zdroj tepla. Ve vrchní části sušárny je umístěna násypka pro sušený materiál a ve spodní části je umístěna výsypka pro vysušený materiál. Pracovní prostor sublimační sušárny je spojen s vymrazovacím kondenzátorem.

Při procesu sublimačního sušení nejprve dojde k prudkému zamražení sušeného materiálu. Ochlazování sušeného materiálu může probíhat chlazením kontaktních ploch, či proudem chladícího vzduchu nebo vakuovým chlazením. Po schlazení probíhá sublimace, přičemž tento jev nastává díky přívodu tepla přes kontaktní plochy, a to vše při tlaku od 10 do 100 Pa. Je nutné, aby se teplota nezvýšila nad teplotu tání ledu.

Sublimační sušárny jsou nejčastěji provozovány v periodickém režimu. Jsou vysoce produktivní a výsledná kvalita sušeného materiálu snese nejpřísnější měřítka, ale zároveň je tento typ sušáren značně energeticky náročný na provoz. Nejčastěji se sublimační sušárny využívají pro sušení ovoce, zeleniny, kávy, čaje a jiných produktů.

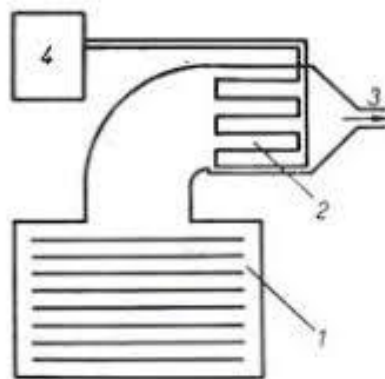


Schéma sublimační sušárny
1 — vlastní sušárna, 2 — kondenzační
(vymrazovací) komora, 3 — vedení
k vývěvě, 4 — chladič stroj

Obr. 10: Sublimační sušárna (převzato z [19])

7. Vývěva [11] [12]

Snižování tlaku je využíváno v různých průmyslových odvětvích a vědeckých oborech. Z nich je možné jmenovat elektrotechniku, kryogeniku, potravinářství, zdravotnictví ad. Toto velké rozšíření je zejména díky fyzikálním vlastnostem materiálů a chemických látek při sníženém tlaku. Zařízení, které se používá pro vytvoření podtlaku odsáváním plynů z uzavřeného prostoru, se nazývá vývěva. Vývěvou lze také nazvat jako plynové čerpadlo, jelikož existuje spousta konstrukčních variant vývěv, stejně jako čerpadel. Je možné rozdělit vývěvy podle několika hledisek. Například dle fyzikálního principu činnosti či dle míry vakua.

7.1. Dělení vývěv podle principu činnosti

- mechanické vývěvy (pracují jako pumpa):
 - pístová vývěva-hlavně pro demonstrační účely
 - odstředivé čerpadlo
 - šroubové kolo
 - rotační vývěva-výroba jemného vakua
- princip Bernoulliho jevu-stržení molekul plynu proudem kapaliny nebo plynu:
 - parní vývěva (ejektor) – použití u sací brzdy
 - vodní vývěva – jednoduchý systém
 - vzduchová vývěva
 - difuzní vývěvy rtuťové, olejové atd. - tvorba vysokého vakua
- Sorpční vývěvy-pro vysoké vakuum
 - ionizační vývěva-molekuly plynu vázány elektrickým polem
 - sorpční vývěva

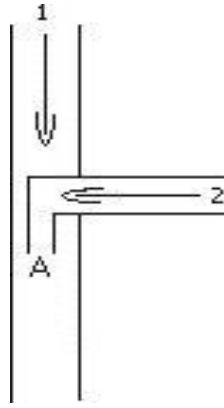
7.2. Dělení vývěv podle stupně vakua

- Vývěvy pro podtlak (do 300 hPa):
 - pístová vývěva

- odstředivé čerpadlo
- Vývěvy pro hrubé vakuum (300-1 hPa):
 - vodní vývěva
 - šroubové kolo
- Vývěvy pro jemné vakuum (do 10^{-3} hPa):
 - rotační vývěva, jednostupňová a dvoustupňová
- Vývěvy pro vysoké vakuum (do 10^{-7} hPa):
 - difuzní vývěva
 - sorpční vývěva
- Vývěvy pro ultra vysoké vakuum (do 10^{-12} hPa):
 - ionizační vývěva
 - turbomolekulární vývěva

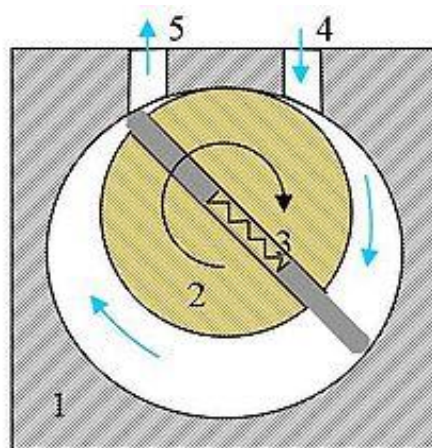
7.3. Příklady konstrukcí vývěv

- Princip fungování pístové vývěvy je podobný principu pumpy s pístem uvnitř válce s ventily. Má velmi jednoduchou konstrukci, ale lze s ní dosáhnout jen slabého podtlaku.
- Fungování kapalinové (vodní) vývěvy je ukázáno na obrázku 11. Uvnitř trubice 1 proudí vysokou rychlostí kapalina. Do této trubice je zavedena trubice 2, která je vyvedena do odčerpávaného prostoru. Díky Bernoulliho jevu je tlak v místě rychle proudící kapaliny na nižší úrovni než v místě, kde kapalina proudí pomaleji. Rozdíl tlaků je nasáván z trubice 2 a je odváděn vývodem trubice 1. Funkci vývěvy pomáhá i fakt, že částice plynu v trubici 2 jsou v místě A odtrhávány proudící kapalinou. Dnes vyráběné kapalinové vývěvy mohou dosáhnout tlaku až 10 Pa.



Obr. 11: Schéma kapalinové vývěvy (převzato z [12])

- Pro dosažení jemného vakua se nejčastěji používá rotační vývěva. Tento typ vývěvy lze také použít jako první stupeň systému pro vysoké a ultra vysoké vakuum. Uvnitř válcové komory (1) dochází k otáčení válce (2), jenž se na jedné straně těsně dotýká stěny komory. Uvnitř štěrbin válce se nacházejí dvě přepážky (3), které jsou od sebe odtlačovány pružinami, tudíž těsně přiléhají ke stěnám komory. Nasávání plynu dochází v pravém hrdle (4). Dochází ke stlačování plynu, který je následně vypouštěn levým hrdlem (5). Nejčastěji je celý systém rotační vývěvy ponořen v oleji. Pokud je vývěva správně seřízena, je možno dosáhnout vakua až 10^{-4} hPa.



Obr. 12: Princip rotační vývěvy (převzato z [12])

- Uvnitř difúzní vývěvy se nenacházejí žádné pohyblivé částice. Tento typ vývěvy pracuje na podobném principu jako kapalinová vývěva, která v oblastech vyššího vakua způsobuje jen strhávání molekul plynu rychlostí proudící kapaliny či páry. Úroveň dosahovaného vakua je omezena tlakem nasycených par čerpané kapaliny, kterou byla dříve rtuť a v dnešní době speciální olej.

- Vzhled turbomolekulárních vývěv připomíná mnohastupňové lopatkové turbíny (obrázek 14), které molekulám plynu předávají kinetickou energii, která je odstraňuje z čerpaného prostoru.



Obr. 13: Turbomolekulární vývěva v řezu (převzato z [26])

8. Typy vývěv [11], [12]

8.1. Olejové rotační vývěvy

Nejčastěji používaným typem průmyslových vývěv jsou olejové rotační vývěvy. Jsou nejvhodnější pro trvalý provoz, ale používají se i pro přerušovaný provoz. Generují vakuum do tlaku 0,1 mbar. Uvnitř všech moderních jednostupňových olejových vývěv je integrován odlučovač olejové mlhy, který slouží k odfiltrování oleje z vyfukovaného vzduchu. Tento odfiltrovaný olej je nasáván do vývěvy a dochází k jeho recirkulaci.

Olejové rotační vývěvy fungují na principu vytváření srpovitého prostoru, který je tvořen excentricky uloženým rotorem. Srpovitý prostor se dělí na komory a lamely. Během otáčení rotoru dochází ke zmenšování objemu komor a dochází tak ke kompresi. Lamely, které jsou uloženy v drážkách statoru, jsou od statoru těsněny olejem. Vzduch, jenž je vyfukován, již neobsahuje žádný olej, jelikož prochází odlučovačem olejové mlhy.

Čerpací rychlost olejových rotačních vývěv se pohybuje od 4 m³/h do 1600 m³/h. Výkon motoru je v rozmezí od 0,1 kW do 30 kW a maximální vakuum, kterého lze dosáhnout je 0,1 mbar_(abs). Mezi výhody olejových rotačních vývěv patří odolná konstrukce, značná energetická úspora a vyrobené vakuum, které je vhodné pro většinu aplikací. Olejové rotační vývěvy se používají v potravinářském průmyslu, zdravotnictví, vakuovém sušení nebo při výrobě plastů.

Kompaktní vývěvy, které mají čerpací rychlost do 16 m³/h, jsou používány pro zabudování do stroje nebo jsou aplikovány tam, kde je požadováno odsátí jen malého množství plynu. Standardní vývěvy, jejichž čerpací rychlost je do 300 m³/h, se řadí k nejpoužívanějším typům vývěv a jsou vhodné pro nespočet aplikací. Pomaloběžné vývěvy s čerpací rychlostí do 1600 m³/h jsou schopny odsávat velké množství plynů, nebo je lze použít jako centrální zdroj vakua.



Obr. 14: Kompaktní vývěva (převzato z [11])



Obr. 15: Standartní vývěva (převzato z [11])

8.2. Grafitové vývěvy

Grafitové vývěvy se řadí mezi bezolejové rotační vývěvy. Tyto vývěvy jsou chlazené pomocí vzduchu a lze je použít jak pro trvalý provoz, tak i pro přerušovaný provoz. Pracují na podobném principu jako olejové rotační vývěvy. Jediný rozdíl je, že grafitové vývěvy pracují bez maziv. Tam, kde jsou u olejových rotačních vývěv kompozitové lamely těsněné olejem, jsou v suchoběžných vývěvách umístěny grafitové lamely.

Princip fungování suchoběžných vývěv spočívá v nasátí vzduchu skrz integrovaný sací filtr. Excentricky uložený rotor rotuje uvnitř válce. Grafitové lamely se klouzavě pohybují ve štěrbinách rotoru, kde jsou tlačeny odstředivou silou směrem k rotoru. Během otěru lamel dochází ke snižování tření a k lepší těsnosti vývěvy. Lamela uzavírá srpovitý prostor, který je mezi rotorem a statorem. Objem tohoto srpovitého prostoru se mění a tím nastává nasávání, komprese a výfuk vzduchu.

Čerpací rychlosti grafitových vývěv jsou v rozmezí od 3 m³/h do 500 m³/h. Výkony motorů grafitových vývěv se pohybují od 0,1 kW do 15 kW a maximální vakuum, které lze vyrobit, je 100 mbar_(abs). Výhody grafitových vývěv jsou provoz bez použití oleje a nízká četnost údržby. Lze je také použít jako kompresory pro vakuotlaké aplikace. Grafitové vývěvy se vyskytují ve zdravotnictví, vakuové manipulaci a upínání, dřevozpracujícím průmyslu a dalších průmyslových provozech.

Grafitové mini vývěvy, jejichž čerpací rychlost je do 8 m³/h, jsou spolehlivým zdrojem vakua, které neobsahuje žádný olej. Lze je využívat s přímým zabudováním do stroje. Kompaktní

grafitové vývěvy s čerpací rychlostí do 40 m³/h jsou brány jako ideální zdroj vakua pro podtlakovou manipulaci. Standardní grafitové vývěvy, které mají čerpací rychlost do 140 m³/h, mají hlavní využití pro uchopování středně prodyšných předmětů.



Obr. 16: Kompaktní grafitová vývěva (převzato z [11])

8.3. Vodokružné vývěvy

Kapalinokružné vývěvy se využívají v nejnáročnějších aplikacích. S ohledem na možné nasátí nečistot lze říci, že vodokružné vývěvy jsou nejdolnějšími průmyslovými vývěvami. Kapalinokružné vývěvy zvládají čerpat výbušné plyny a nečiní jim potíže nasazení ve výbušném prostředí. Chlazení vývěv je zajištěno protékající vodou, přičemž pro výbušné prostředí či silně znečištěné prostředí se využívá průtočný systém chlazení, kdy voda vývěvou protéká, a pro ostatní aplikace se využije systém částečné nebo úplné recirkulace. Pro systém s úplnou recirkulací pracovní kapaliny odpadá potřeba průběžného doplňování.

Čerpací rychlost je u vodokružných vývěv dle typu od 30 m³/h do 37 000 m³/h. Výkon motoru pro vodokružnou vývěvu je od 0,75 kW do 680 kW, přičemž maximální vakuum, které lze vyrobit, je 33 mbar_(abs). Mezi výhody patří vysoká odolnost vůči nečistotám, odolná a robustní konstrukce. Tyto vývěvy jsou téměř bezúdržbové a při nasazení ve výbušném prostředí bývají vybaveny ochranným zařízením.

8.3.1. Kompaktní vodokružné vývěvy

Nejrozšířenějším typem vodokružných vývěv jsou kompaktní vývěvy. Tyto vývěvy jsou určeny pro práci do maximálního podtlaku 30 mbar_(abs), přičemž průtok je od 30 m³/h do 300 m³/h. Oběžné kolo těchto vývěv je instalováno přímo na hřídel motoru. Nejčastěji jsou z litinových či nerezových materiálů.

Kompaktní vodokružné vývěvy se využívají v chemickém a farmaceutickém průmyslu, pro vakuové sušení a destilaci, v potravinářském průmyslu či v papírenství a tiskařství.

8.3.2. Univerzální vodokružné vývěvy

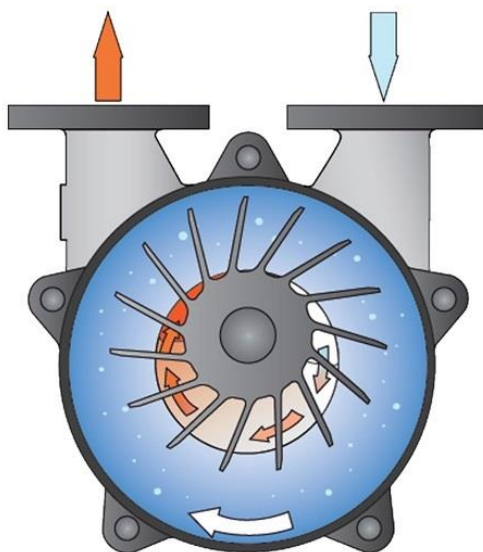
Velmi efektivní rozsah čerpacího spektra pokrývají jednostupňové univerzální vývěvy, a proto se hojně využívají pro vakuování komor. Tyto vývěvy mají značné univerzální využití. Čerpací rychlost jednostupňových vývěv je od 50 m³/h do 1700 m³/h, přičemž maximální dosažené vakuum má hodnotu 33 mbar_(abs). Pro připojení těchto vývěv k motoru se využívají spojky, jelikož vývěva a patkový motor se nachází na stejné základně. Pokud je vývěva připojena na elektromotor, využívá se přírubové připojení. Jednostupňové univerzální vývěvy jsou z litiny či nerezového materiálu.

Využití jednostupňových univerzálních vývěv lze najít v celé řadě aplikací. Nejčastěji se objevují v chemickém a farmaceutickém průmyslu, ve výrobě plastů a v dřezpracujícím průmyslu.

8.3.3. Jednostupňové vodokružné vývěvy

Pro maximální hodnotu vakua do 200 mbar_(abs) se používají jednostupňové vodokružné vývěvy. Průtoková rychlost u těchto vývěv je v rozmezí 20 m³/h do 3100 m³/h. Jednostupňové vodokružné vývěvy se k motoru připojují pomocí spojky a leží na společné základně s patkovým motorem. Tyto vývěvy jsou nejčastěji z litinových či nerezových materiálů.

Jednostupňové vodokružné vývěvy jsou používány především v potravinářském průmyslu, papírenství a tiskařství či vakuové manipulaci.



Obr. 17: Jednostupňová vodokružná vývěva (převzato z [11])

8.3.4. Dvoustupňové vodokružné vývěvy

Pro dlouhodobou práci při sníženém tlaku, který je v rozmezí od 200mbar_(abs) do 33 mbar_(abs), se jeví jako ideální řešení použít dvoustupňové vodokružné vývěvy. Tyto vývěvy mají průtokovou rychlost od 20 m³/h do 3100 m³/h. Při užití stejné základny se motor a vývěva spojují spojkou. Materiálem, ze kterého jsou dvoustupňové vodokružné vývěvy, je nerez.

Hlavní využití dvoustupňových vývěv je ve vakuovém sušení, v potravinářském průmyslu a ve vakuové manipulaci.

8.3.5. Velkoobjemové vodokružné vývěvy

Velkoobjemové vodokružné vývěvy se řadí mezi skupinu pomaloběžných speciálních strojů, které mají velmi dlouhou životnost. Čerpací rychlost těchto vývěv je v rozmezí od 3 000 m³/h do 40 000 m³/h. Velkoobjemové vodokružné vývěvy lze rozdělit na jednostupňové vývěvy, které pracují s vakuem nad 200 mbar_(abs), a dvoustupňové vývěvy, jejichž pracovní vakuum může být maximálně 33 mbar_(abs). Pro napojení vývěv k motoru se využívají spojky nebo řemenová propojení. Velkoobjemové vodokružné vývěvy jsou nejčastěji v litinovém provedení.

Nejčastěji můžeme najít velkoobjemové vodokružné vývěvy v chemickém a farmaceutickém průmyslu, potravinářském průmyslu a v zařízeních na vakuové sušení a destilaci.

8.4. Zobákové vývěvy

Zobákové vývěvy se řadí do skupiny bezolejových průmyslových vývěv, které jsou chlazeny vzduchem. Lze je využívat jak v trvalém provozu, tak i při přerušovaném provozu. Zobákové vývěvy jsou téměř bezúdržbové a mají velmi nízké provozní náklady. Tyto vývěvy obsahují tlumič, který je umístěn na výstupu a je určen pro tlumení pulzujícího zvuku na výstupu z vývěvy. Zobákové vývěvy zvládají pracovat i jako kompresory, tím pádem je lze využívat i ve vakuo-tlakových aplikacích.

Princip fungování zobákových vývěv je určen dvěma rotory ve tvaru dvojzobáku. Ve statoru dochází k protisměrnému otáčení těchto rotorů při malých tolerancích, přičemž nedochází ke kontaktu mezi státorem a rotorem a ani ke kontaktu mezi rotory. Do kompresní komory je nasáván vzduch a díky pohybu zubů rotoru v prostoru sací přípojky je vzduch přepravován směrem od sání k výfuku.

Zobákové vývěvy dosahují čerpacích rychlostí od 50 m³/h do 950 m³/h, přičemž výkon motoru se pohybuje v rozmezí od 1,1 kW do 18,5 kW. Maximální hodnota vakua, která lze získat z těchto vývěv, je 20 mbar_(abs). Mezi výhody zobákových vývěv patří spolehlivý a málo energeticky náročný pracovní proces. Tyto vývěvy se využívají hlavně v pneumatické dopravě, vakuové manipulaci a ve zdravotnictví.



Obr. 18: Zobáková vývěva (převzato z [11])

8.5. Šroubové vývěvy

Nejčastěji se šroubové vývěvy používají v oblastech, kde jiné typy vývěv nelze použít. Šroubové vývěvy se řadí do skupiny suchoběžných vývěv a jsou vhodné pro používání v chemických a farmaceutických aplikacích. Tyto vývěvy zvládají čerpat výbušné plyny či mohou být umístěny v prostředí, ve kterém může dojít k výbuchu. Chlazení šroubových vývěv je nejčastěji zajišťováno chladicí vodou, přičemž součástí příslušenství šroubových vývěv jsou výměníky, které jsou určeny pro chlazení vzduchem či pro sekundární vodní chlazení. Díly, které přichází do kontaktu s médiem, bývají velmi často povrchově upravovány z důvodu odolávání chemického působení čerpaných chemikálií. Šroubové vývěvy se proplachují z důvodu pročišťování, a to jak před odstávkou, tak během provozu.

Šroubové vývěvy pracují na principu otáčení dvou šroubových rotorů uvnitř válce. Pohyb válců je usměrňován pomocí převodového soustrojí. Plyn se od sání zachycuje uvnitř prostoru, který vznikne mezi válcem a šroubem, a následně je plyn transportován k výtlaku.

Čerpací rychlost šroubových vývěv je od 100 m³/h do 2 500 m³/h při výkonu motoru od 3,5 kW do 55 kW. Šroubové vývěvy dosahují maximálního vakua 0,05 mbar_(abs). Tyto vývěvy jsou suchoběžné a téměř bezúdržbové. Výhodou šroubových vývěv je vytvoření velkého vakua v jednostupňové vývěvě. Tyto vývěvy jsou aplikovány v chemickém průmyslu, vakuovém sušení či v pokovování a povlakování.



Obr. 19: Šroubová vývěva (převzato z [11])

8.6. Pístové vývěvy

Pro silně znečištěné pracovní prostředí je vhodné použít vývěvy s kolujícím pístem, které mají robustnou konstrukci a které jsou odolné vůči nečistotám. Tento typ vývěv je chlazený vodou, přičemž je zde využíván sekundární výměník. Vývěvy s kolujícím pístem jsou schopny i přes

hluboké vakuu udržet vysokou čerpací rychlost. V provozech lze najít tento typ vývěv již 70 let. Pokud je požadována hlubší hodnota vakua či zvýšení čerpací rychlosti, je nutné využít předsazené posilovací Rootsovy vývěvy.

Vývěvy s kolujícím pístem fungují na principu používání třech propojených pístů, které jsou vůči sobě paralelně uspořádány a bývají z principu vyváženy. Tyto vývěvy jsou velmi spolehlivé a lze je používat i v silně znečištěném prostředí. Těsněné místo, které se nachází mezi pístem a válcem, je utěsněno olejem. Na výstupu z vývěvy najdeme odlučovač olejové mlhy. Tyto vývěvy fungují při nízkých otáčkách, díky čemuž mají ložiska velice dlouhou životnost.

Tento typ vývěv má čerpací rychlost v rozmezí od 36 m³/h do 1350 m³/h při výkonech motoru od 1,1 kW do 30 kW. Vývěvy s kolujícím pístem zvládají maximální vakuu 0,00026 mbar_(abs). Mezi výhody těchto vývěv lze zařadit jejich robustní konstrukci, odolnost vůči nečistotám, značnou čerpací rychlost při nízkém tlaku a velmi dlouhou životnost. Využití nachází pístové vývěvy hlavně v těžkém a chemickém průmyslu, dále pak ve vakuovém lití, pájení a ve vakuových pecích.



Obr. 20: Pístová vývěva (převzato z [11])

8.7. Rootsovy vývěvy

Pro Rootsovy vývěvy se vyskytuje několik dalších názvů, jako například Rootsova dmyhadla, vakuové boostery či posilovací vývěvy. Jsou využívány pro zvyšování vakua nebo pro zvyšování čerpací rychlosti. Vývěva, která potřebuje posílení, je posilována jednou či více

Rootsovými vývěvami. Je možné kombinovat Rootsovy vývěvy s téměř všemi druhy vývěv. Nejčastěji se Rootsovy vývěvy používají v provozech s trvalým chodem. Chlazení těchto vývěv je zajišťováno vzduchem nebo vodou.

Rootsovy vývěvy fungují na principu protiběžného otáčení dvou pístů, které mají tvar ledviny, uvnitř statoru. Při rotaci nesmí dojít ke kontaktu pístů navzájem a ani ke kontaktu pístu se statorem. Rootsovy vývěvy se řadí mezi bezolejové vývěvy. Rotace pístů je řízena dvojicí ozubených kol, která jsou umístěna v převodovce, jenž je na konci hřídele. Olej je zde využíván pouze v převodovce a nepřichází do kontaktu s čerpaným médiem. Pokud je to nutné, je k Rootsovým vývěvám přidáván bypass, uvnitř kterého proudí vzduch, který udržuje tlakový rozdíl nad požadovanou mezí.

Čerpací rychlosti u Rootsových vývěv jsou v rozmezí od 200 m³/h do 15 500 m³/h, přičemž výkon motoru je od 0,75 kW do 30 kW. Maximální hodnota vakua, které jsou tyto vývěvy schopny vytvořit, je 130 mbar_(abs). Za výhody lze považovat zvýšení čerpací rychlosti, prohloubení vakua, energetickou efektivnost a dlouhou životnost. Rootsovy vývěvy mají uplatnění v chemickém průmyslu, pokovování nebo ve vakuovém sušení a destilaci.



Obr. 21: Rootsova vývěva (převzato z [11])

8.8. Dvoustupňové olejové vývěvy

Pro generování vakua v rozsahu od 1 mbar do 0,001 mbar je nejvhodnější používat dvoustupňové olejové rotační vývěvy. Tyto vývěvy lze používat ve velmi špinavém prostředí, uvnitř kterého nelze používat vývěvy s recirkulací oleje. Dvoustupňové vývěvy se také používají v aplikacích, kde je vyžadováno hluboké vakuum.

Tyto dvoustupňové olejové rotační vývěvy pracují na podobném principu jako dvě samostatné jednostupňové rotační vývěvy. Vzduch je přefukován z jednoho stupně do druhého stupně.

Takto lze dosáhnout většího stupně komprese a díky tomu zvládne vývěva vytvořit mnohem hlubší vakuum. Průtočnými olejovými vývěvami olej pouze protéká a nevrací se zpět do vývěvy.

Čerpací rychlost dvoustupňových olejových vývěv je v rozmezí od 2 m³/h do 630 m³/h. Výkon motoru je od 0,37 kW do 15 kW. Lze dosáhnout maximálního vakua 0,001 mbar_(abs). Výhodami jsou výroba hlubokého vakua v jedné vývěvě a odolnost proti korozivním plynům s možností proplachu. Tyto vývěvy jsou aplikovány v pokovování, chemickém a farmaceutickém průmyslu a u heliového hledání netěsností.



Obr. 22: Dvoustupňová olejová vývěva (převzato z [11])

9. Experimentální část

Pro uskutečnění návrhu sušárny na krmné směsi s kontaktním ohřevem je nutné znát experimentálně určené charakteristiky. Mezi hlavní charakteristiky lze zařadit sušící křivku, měrnou odpařivost a energetickou náročnost sušení. Získání dat pro vyhodnocení těchto charakteristik proběhlo pro dva různé typy sušícího zařízení. V první části jsme se zaměřili na atmosférické sušení a v druhé části probíhalo sušení uvnitř vakua, jenž bylo vytvořeno vývěvou. Oba typy měření probíhaly se změnami teploty otopu sušárny, změnami objemového zaplnění a s různými vlhkostmi materiálu.

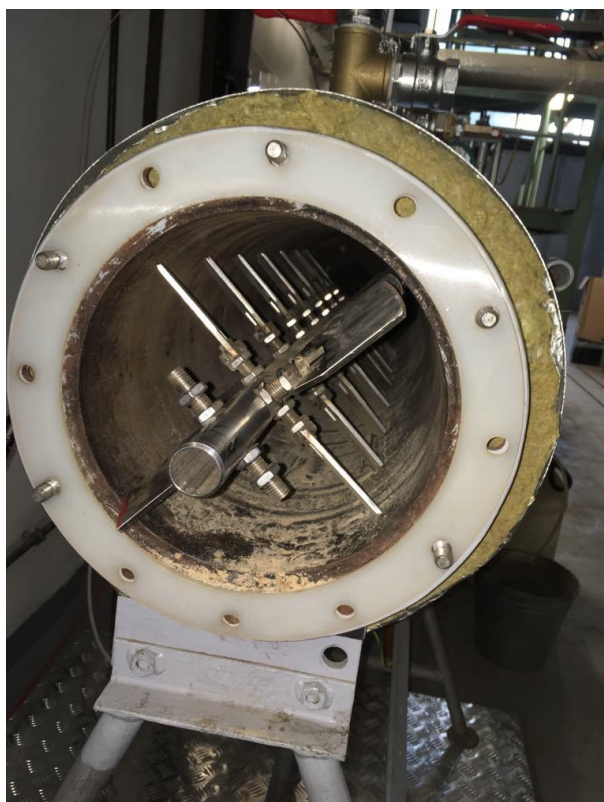
9.1. Atmosférické sušení

Sušení probíhalo v kampaňovité sušárně s rotujícími lopatkami, která se nachází v prostorách laboratoří ČVUT na Julisce. Pro měření byla použita krmná směs, která měla před sušením vlhkost cca 25 %. Hmotnost materiálu byla vždy měřena digitální vahou. Elektrický proud, kterým se vytápí stěny sušárny a jímž je vysoušen materiál, byl měřen pomocí pulzů.

Zařízení, na kterém probíhalo měření, je kampaňovitá sušárna. Délka sušárny je 1 m a vnitřní průměr je 26 cm. Sušárna je umístěna na stojanu. Válec sušárny je otápěn elektřinou a teplota je nastavována pomocí termostatu. Sušárna je uzpůsobená proti unikání tepla díky izolaci, uvnitř které je umístěn otvor, kterým je odváděna vodní pára od sušeného materiálu. Míchadlo je poháněno pomocí elektromotoru s převodovkou a řetězovým převodem. Míchadlo je umístěno v sušárně z důvodu lepšího vysoušení materiálu a lze jej vytáhnout. To je důležité pro možnost plnění sušárny sušeným materiálem.



Obr. 23: Kampaňovitá sušárna



Obr. 24: Kampaňovitá sušárna-pohled dovnitř

9.1.1. Postup sušení materiálu

Kampaňovitá sušárna je plněna ručním vkládáním nevysušeného materiálu do prostoru sušárny. Nejprve je ovšem nutné sundat izolační kryt víka, které je přišroubované k válci sušárny. Následně se ještě vysune míchadlo, přičemž vše probíhá v co nejkratším čase, aby po otevření sušárny došlo k co nejmenšímu poklesu teploty otápeného pláště z důvodu chlazení okolním vzduchem. Materiál se vkládá do sušárny pomocí plechové lopatky a je rovnoměrně rozložen po celé délce sušárny. Při měření s velkým objemovým zaplněním docházelo k plnění skrz otvor, jenž je určen pro odvod vzniklé páry. Tento způsob plnění byl použit pro nemožnost rovnoměrného rozložení materiálu uvnitř sušárny, kdy by mohlo dojít k potížím při vkládání míchadla. Sušárna se roztápí uzavřená a bez materiálu, ale míchadlo se nechává při nahřívání uvnitř, a to z důvodu omezení tepelných ztrát, které by vznikaly při ohřívání materiálu míchadla. Pro natopení sušárny na 130 °C se spotřebuje cca 1,5 kWh elektrické energie. Po vložení materiálu se do sušárny vrátí míchadlo, izolační kroužek víka a víko, které se opět přišroubuje. Následně je víko zakryto izolací a zvaží se hmotnost materiálu na počátku sušení. Tím začíná proces sušení. Doba trvání byla individuální a lišila se vždy podle teploty otopu a objemového zaplnění. Každých 5 minut byla odečtena hodnota hmotnosti materiálu, přičemž zjištěná hodnota ukazovala hmotnostní úbytek materiálu, který je roven hmotnosti odpařené vody ze sušeného materiálu.

Materiálem, který byl sušen, byla krmná směs navlhčená na 22 % a na 19,5 % vlhkosti. Pro každé měření byl vybrán reprezentativní vzorek, jenž byl sušen ve speciální sušárně (obr. 25) na téměř nulovou vlhkost. Tento vzorek byl vždy rozdělen do misek, které byly váženy na speciálních vahách. Po vyjmutí materiálu ze sušárny se vždy měřila konečná hmotnost materiálu po sušení, teplota materiálu na výstupu ze sušárny a byl odebrán vzorek sušeného materiálu, jenž byl následně rozdělen do misek a vkládán do speciální sušárny, jak již bylo popsáno. Tímto měřením byla zjištěna zbytková vlhkost na výstupu z kampaňovité sušárny.



Obr. 25: Speciální sušárna

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách pro každé měření. Každá tabulka obsahuje hmotnost misky, hmotnost materiálu před a po sušení, hmotnost odpařené vody. Dále jsou v tabulce vypočítané vlhkosti a je uvedena hodnota spotřebované elektrické energie na otop sušárny. Výsledky jsou uvedeny v příloze 1.

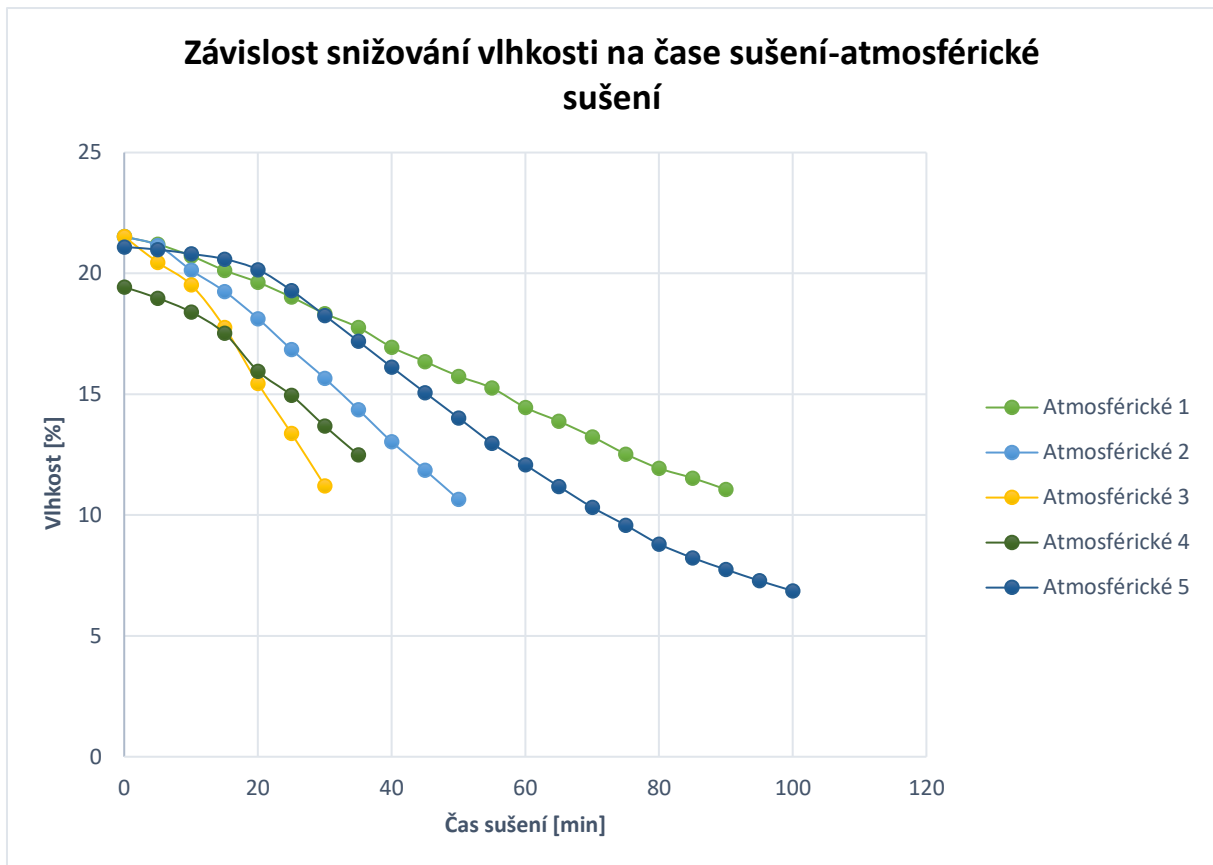
9.1.2. Typy měření

Číslo měření	1	2	3	4	5
Teplota otopu [°C]	110	130	150	130	130
Zaplnění [%]	15	15	15	15	45
Vstupní vlhkost [%]	21,522	21,522	21,522	19,431	21,093

Tabulka 1: Typy měření atmosférického sušení

9.1.3. Křivka sušení

Během sušícího procesu byly zapisovány hodnoty úbytku hmotnosti, ke kterým docházelo z důvodu odpařování vody z materiálu. K odečítání hodnot docházelo každých pět minut. Při vyhodnocení byla určena vlhkost materiálu na vstupu do sušárny a v grafu 4 je uvedena závislost snižování vlhkosti na čase sušení u atmosférického sušení.



Graf 4: Závislost snižování vlhkosti na čase sušení

9.1.4. Výsledky měření

Při měření jsme se zaměřovali na odečet spotřeby elektrické energie, která je využita k otopu sušárny. Hodnoty spotřeby elektrické energie jsou uvedeny v tabulkách výsledků pro každé měření (Příloha 1). Z důvodu sušení krmných směsí nás také zajímala teplota materiálu, který jsme sušili. Teplotu jsme měřili speciálním teploměrem a hodnoty výstupních teplot pro všechna měření jsou uvedena v tabulce 2. Dále jsou v tabulce 2 uvedeny pro každé měření hodnoty měrné odpařivosti plošné a měrné odpařivosti objemové. Pro získání těchto hodnot musíme znát rozměry sušárny. Vnitřní průměr sušárny je 26 cm a délka sušárny je 1 m. Díky znalosti rozměrů lze vypočítat velikost teplo-směnné plochy a objem sušárny.

Teplo-směnná plocha:

$$S_{pl} = 2 * \pi * d * l = 2 * 3,14 * 0,26 * 1 = 1,634m^2$$

Objem:

$$V = \pi * r^2 * l = 3,14 * 0,13^2 * 1 = 0,053m^3$$

Číslo měření	1	2	3	4	5
Teplota materiálu [°C]	84,5	90,5	88,8	88,3	106,2
Δt (otop-materiál) [°C]	25,5	39,5	61,2	41,7	23,8
Odpařená voda [kg/h]	0,246	0,416	0,692	0,38	0,91
Měrná odpařivost plošná [kg/h.m ²]	0,1505	0,254	0,423	0,232	0,556
Měrná odpařivost objemová [kg/h.m ³]	4,641	7,849	13,056	7,169	17,169

Tabulka 2: Teplota materiálu na výstupu a výsledky měrných odpařivostí

9.1.5. Vyhodnocení měření atmosférického sušení

Jedním z cílů experimentů bylo zjistit teplotu materiálu při vyjmutí ze sušárny. Hodnota této teploty může být zásadní pro návrh sušícího zařízení a parametrů sušárny, kterými jsou myšleny teplota otopu, zaplnění, vstupní vlhkost a doba sušení. Bylo požadováno, aby teplota sušeného materiálu nepřekročila 70 °C a aby nedošlo k znehodnocení sušené krmné směsi. Z tabulky 2 je patrné, že teplota materiálu na výstupu ze sušárny se pohybovala v rozmezí od 84,5 °C do 106,2 °C, což neodpovídá požadavkům výrobce krmné směsi. Na obrázku 26 je ukázán rozdíl mezi materiálem, který nebyl sušen uvnitř kampaňovité sušárny (vlevo), a materiálem, jenž prošel procesem sušení v kampaňovité sušárně (vpravo).



Obr. 26: Vzorčky materiálu před sušením (vlevo) a po sušení (vpravo)

9.2. Vakuové sušení

Toto měření probíhalo na stejné kampaňovité sušárně v laboratořích ČVUT na Julisce jako v kapitole 9.2 atmosférické sušení. Podstatný rozdíl mezi měřeními je v připojení vodokružné vývěvy (obr. 27), která se starala o zajištění podtlaku uvnitř sušárny. Měření probíhalo na stejném principu jako atmosférické sušení. Změna byla ve způsobu plnění sušárny vysoušeným materiálem, jenž byl do sušárny vkládán otvorem, který se nachází v horní části sušárny. Hlavním cílem bylo porovnání atmosférického a vakuového sušení krmných směsí, a to nejen z pohledu teploty materiálu na výstupu ze sušárny a energetické náročnosti sušení, ale také porovnání měření pro stejné společné parametry, jimiž byly teplota otopu, zaplnění a rozdíl teplot mezi teplotou otopu a teplotou materiálu na výstupu ze sušárny. Toto porovnání je zobrazeno v kapitole 9.3 a 9.4.



Obr. 27: Vodokružná vývěva pro vakuové sušení

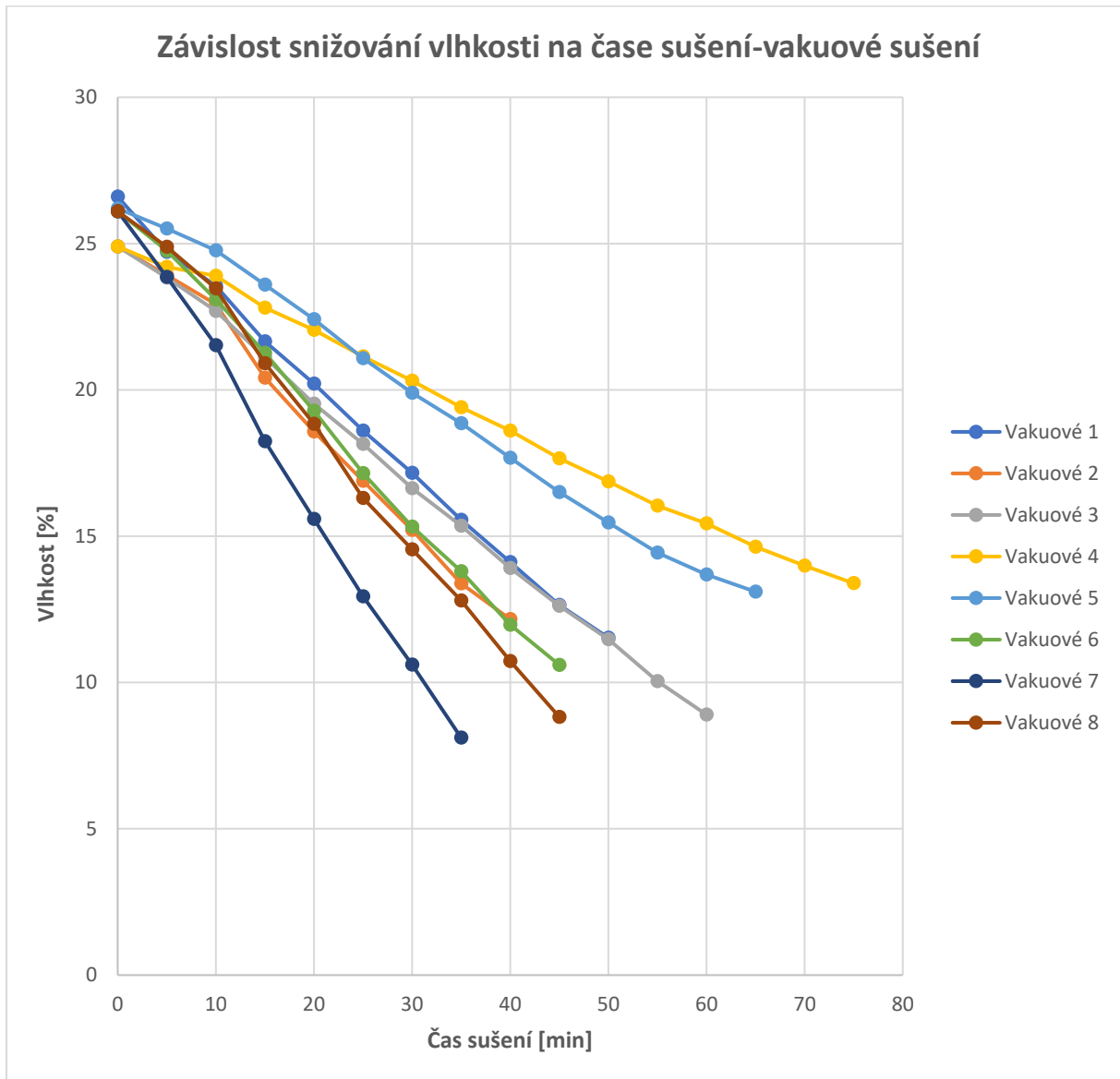
9.2.1. Typy měření

Číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8
Teplota otopu [°C]	95	110	110	110	90	110	130	130
Zaplnění [%]	15	15	30	45	15	15	15	15
Vstupní vlhkost [%]	26,6	24,9	24,9	24,9	26,1	26,1	26,1	26,1
Tlak [bar]	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,475

Tabulka 3: Typy měření vakuového sušení

9.2.2. Sušící křivka

Během sušícího procesu byly zapisovány hodnoty úbytku hmotnosti, ke kterým docházelo z důvodu odpařování vody z materiálu. K odečítání hodnot docházelo každých pět minut stejně jako u atmosférického sušení. Hodnoty pro vyhodnocení pak byly převedeny do grafu 5, ve kterém je zobrazena závislost snižující se vlhkosti na době sušení pro vakuové sušení.



Graf 5: Závislost snižování vlhkosti na čase sušení (vakuové)

9.2.3. Další výsledky měření

Číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8
Teplota materiálu [°C]	64	71	76	75	64	70,3	84,5	93
Δt (otop-materiál) [°C]	31	39	34	35	26	39,7	45,5	37
Odpařená voda [kg/h]	0,514	0,438	1,068	1,576	0,44	0,506	0,586	0,56
Měrná odpařivost plošná [kg/h.m ²]	0,356	0,360	0,557	0,652	0,230	0,386	0,541	0,413
Měrná odpařivost objemová [kg/h.m ³]	10,981	11,113	17,169	20,113	7,113	11,924	16,698	12,754

Tabulka 4: Teplota materiálu na výstupu a výsledky měrných odpařivostí vakuového sušení

9.2.4. Vyhodnocení měření vakuového sušení

Jedním z cílů experimentů bylo zjistit teplotu materiálu při vyjmutí ze sušárny stejně jako u atmosférického sušení. Hodnota této teploty je jedním z důležitých hledisek pro návrh sušícího zařízení a parametrů sušárny, kterými jsou myšleny teplota otopu, zaplnění, vstupní vlhkost a doba sušení a v podtlakovém (vakuovém) sušení také spotřeba elektřiny pro příkon vývěvy. Požadavky na výstupní teplotu byly stejné jako u sušení atmosférického. Teplota materiálu na konci procesu sušení neměla přesáhnout 75 °C, aby nedošlo k znehodnocení sušené krmné směsi. Z tabulky 4 je patrné, že teplota materiálu na výstupu ze sušárny se pohybovala v rozmezí od 64 °C do 93 °C. Jak je z tabulky 4 patrné, u měření číslo 3, 7 a 8 nevyhovuje požadovaná teplota teplotě naměřené a pro sušení krmných směsí jsou tyto 3 návrhové měření

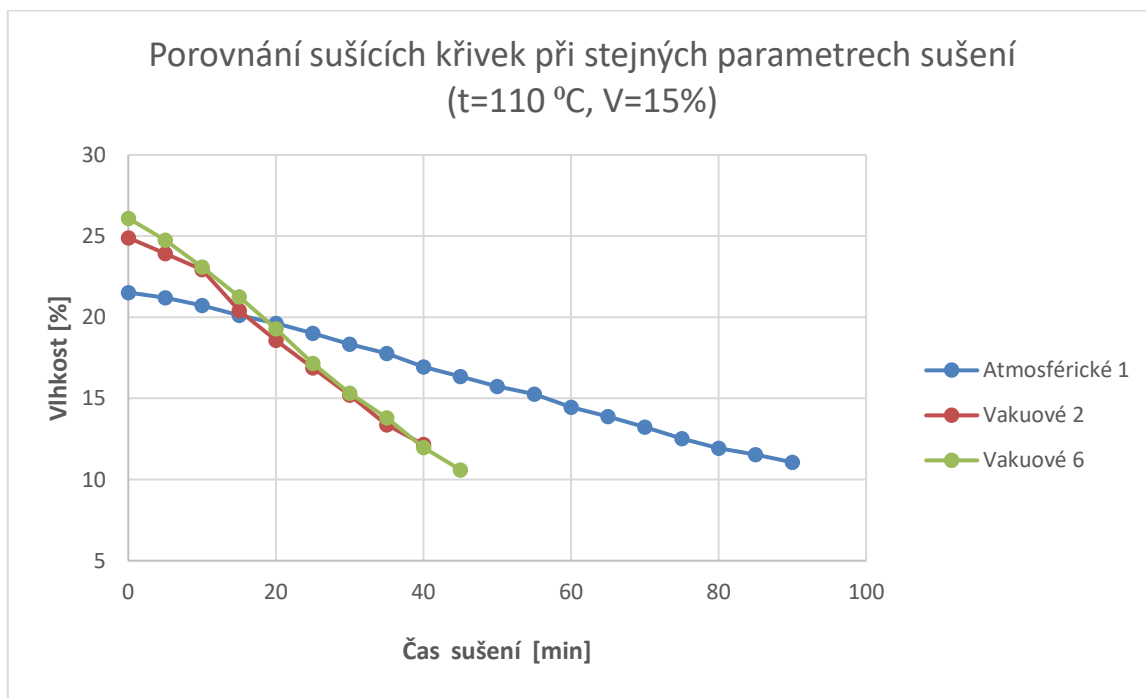
nevyhovující. U ostatních návrhových měření vyšla teplota materiálu po sušení rovna či nižší, než byla požadovaná teplota materiálu po sušení od dodavatele krmných směsí. Lze tedy říci, že pro jedno z vyhovujících typů vakuového sušení při daných parametrech je možné navrhnout sušárnu.

9.3. Porovnání sušících křivek

V této kapitole budou porovnány sušící křivka jednotlivých měření atmosférického a vakuového sušení. Porovnání bylo vytvořeno podle společných parametrů pro jednotlivá měření.

9.3.1. Porovnání dle stejné teploty otopu $t=110\text{ }^{\circ}\text{C}$ a zaplnění 15 %

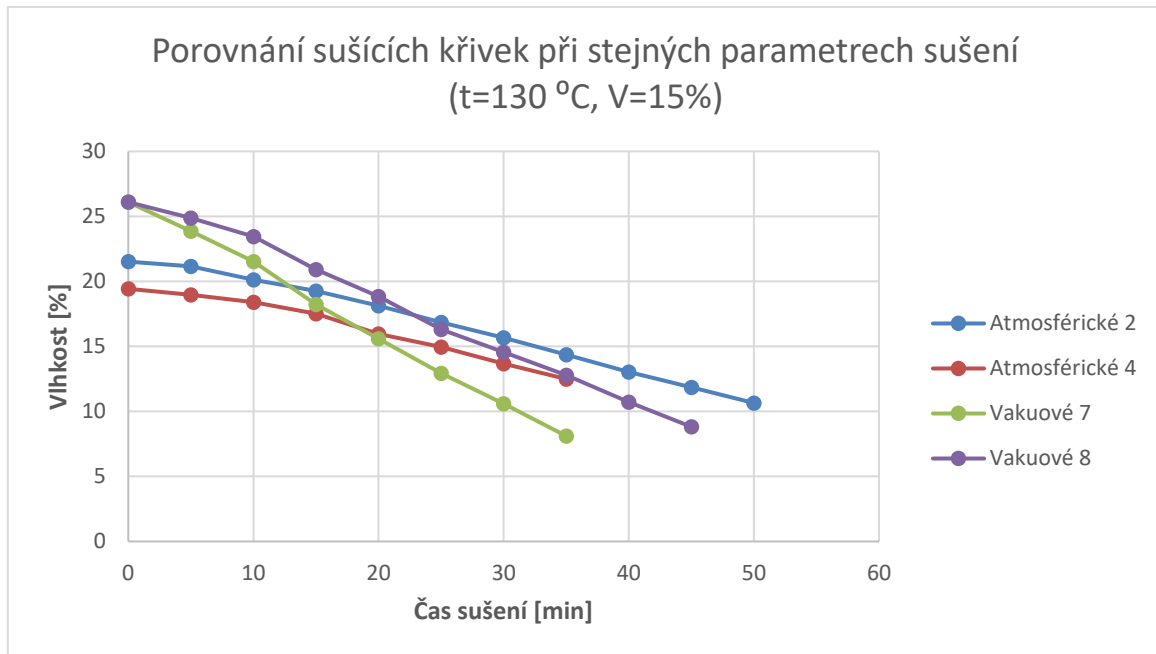
Porovnání jednotlivých měření se stejnými parametry, kterými jsou teplota otopu $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ a zaplnění 15 %, je ukázáno na grafu 6. Z grafu je patrné, že průběh měření vakuového sušení 2 a 6 je oproti měření atmosférického sušení 1 časově mnohem méně náročné. A to i přesto, že při sušení atmosférickém 1 byl použit materiál s nižší vlhkostí. Vliv na rychlost sušení při vakuovém sušení má vývěva, která odsává vzniklou páru. Dále můžeme vidět, jak se na 20. minutě sušení téměř vyrovnává vnitřní vlhkost pro všechna tři měření. Pro přesnější vyhodnocení by bylo nutné vyloučit z vyhodnocení body, které znázorňují ohřev materiálu. Sušící křivky ba pak měly pozvolnější průběh.



Graf 6: Porovnání dle stejné teploty otopu $t=110\text{ }^{\circ}\text{C}$ a zaplnění 15 %

9.3.2. Porovnání dle stejné teploty otopu $t=130\text{ }^{\circ}\text{C}$ a zaplnění 15 %

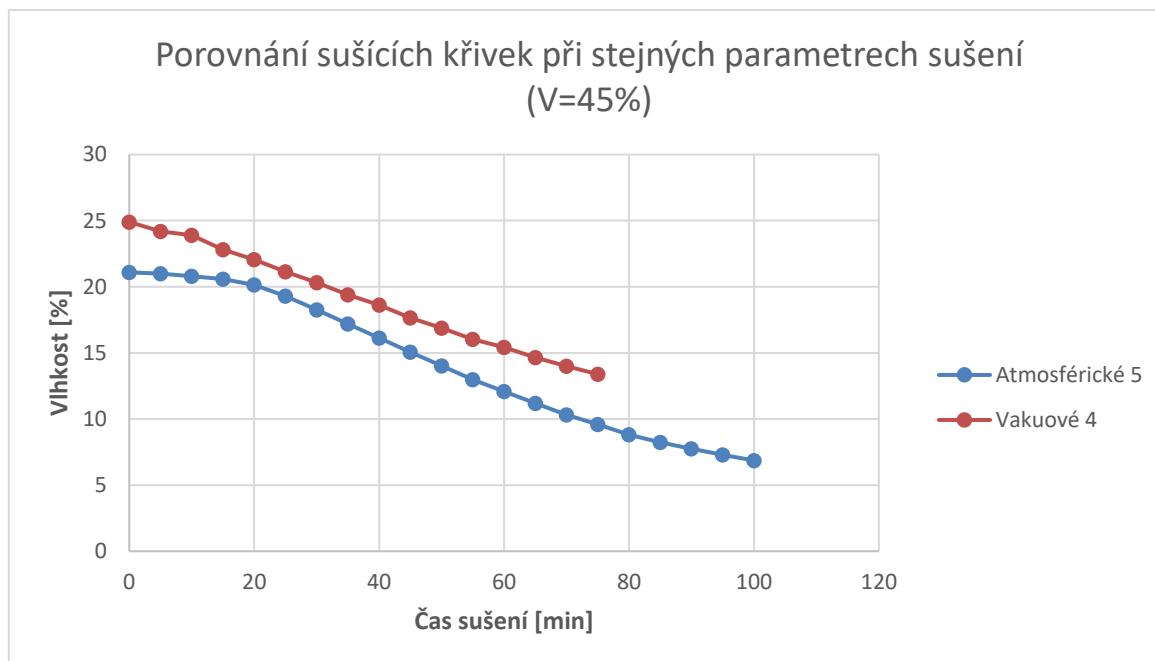
Pro porovnání měření se stejnou teplotou otopu $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ a zaplněním 15 % nám slouží graf 7, na kterém jsou vyneseny sušící křivky atmosférických měření 2; 4 a vakuových měření 7; 8. Z grafu je patrné, že při dosoušení na téměř stejnou výstupní vlhkost je rozdíl mezi dobou sušení u vakuových měření způsoben velikostí vakua. Sušící křivky atmosférických měření jsou méně strmé, než je tomu u měření vakuových. Sušící křivky by měly rozdílný průběh, pokud by vlhkost materiálu na začátku sušení byla pro všechna měření stejná.



Graf 7: Porovnání dle stejné teploty otopu $T=130\text{ }^{\circ}\text{C}$ a zaplnění 15 %

9.3.3. Porovnání dle stejného zaplnění 45 %

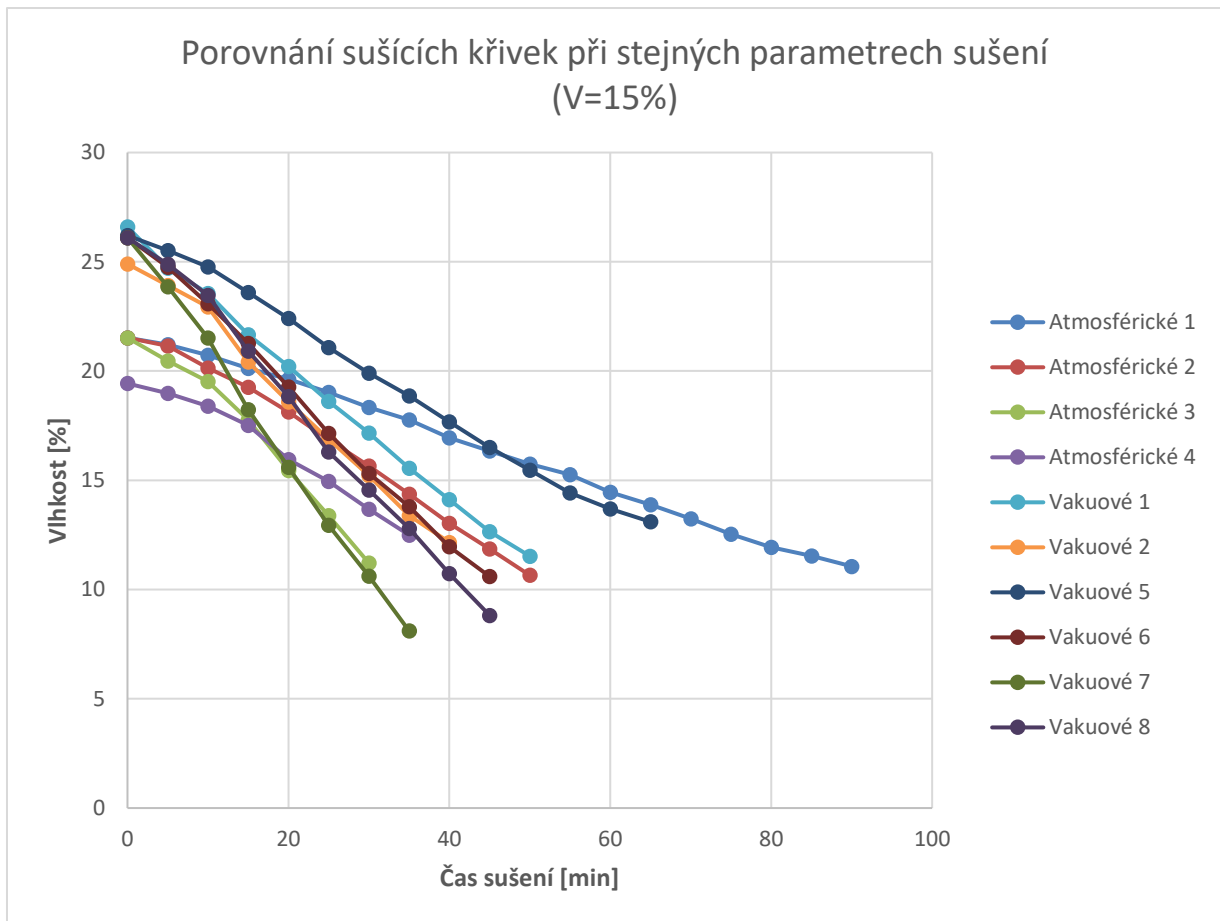
Porovnání měření, jejichž společným ukazatelem je stejné zaplnění sušárny, jenž bylo 45 % objemu, je ukázáno na grafu 8. Z grafu je patrné, že sušící křivka vakuového měření se neprotíná se sušící křivkou sušení atmosférického, což značí, že ve stejný čas neměl materiál stejnou vlhkost. Pokud by byl použit materiál o stejné vstupní vlhkosti, k protnutí by s velkou pravděpodobností došlo. Při takto velkém zaplnění sušárny se využití vakua může ukázat i méně vhodné než sušení při atmosférickém tlaku. Pokud by do vyhodnocení nebyl zahrnut čas pro ohřátí materiálu uvnitř sušárny a čas pro dosoušení materiálu, byly by křivky pozvolnější.



Graf 8: Porovnání dle stejného zaplnění 45 %

9.3.4. Porovnání dle stejného zaplnění 15 %

V grafu 9 je vytvořeno porovnání sušících křivek pro stejné zaplnění sušárny, které bylo 15 %. Toto zaplnění bylo používáno při měření nejčastěji. Rozdíl vlhkostí pro jednotlivá sušení má nejnižší rozptyl na 15. minutě sušení. V grafu je možné vidět rozdíl ve strmosti sušících křivek pro atmosférické a vakuové sušení. Tato strmost ukazuje, jak je vakuové sušení časově méně náročné než sušení atmosférické. Změna strmosti by nastala, pokud by byla vstupní vlhkost materiálu na vstupu do sušárny pro všechna měření stejná. Stejně tak by změna strmosti křivek nastala, pokud by byl z vyhodnocení odebrán čas, který je potřeba k ohřátí materiálu.

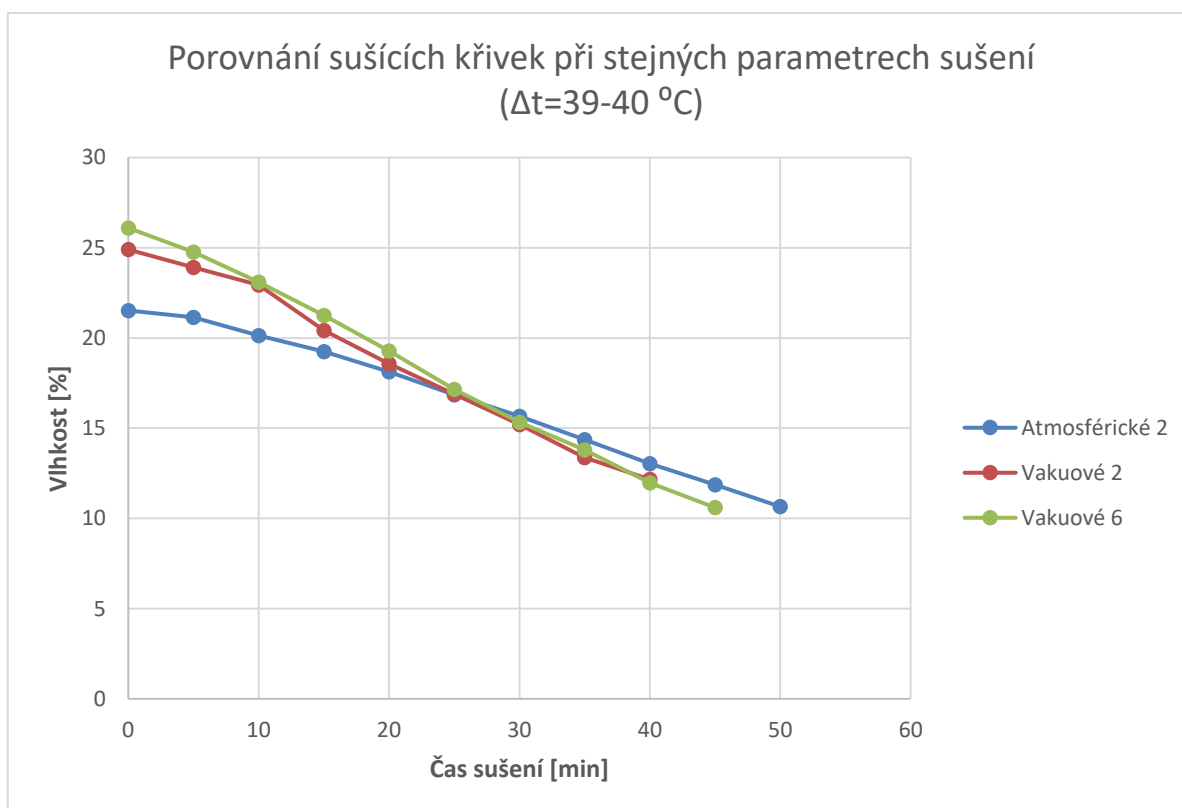


Graf 9: Porovnání dle stejného zaplnění 15 %

9.3.5. Porovnání dle stejného $\Delta t = 39-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Porovnání měření lze vytvořit i podle rozdílu teplot mezi teplotou otopu sušárny a teplotou materiálu, kterou má materiál na konci sušícího procesu. Z tabulek 2 a 4 jsem porovnal rozdíl těchto teplot a určil rozsah, ve kterém budou měření porovnána.

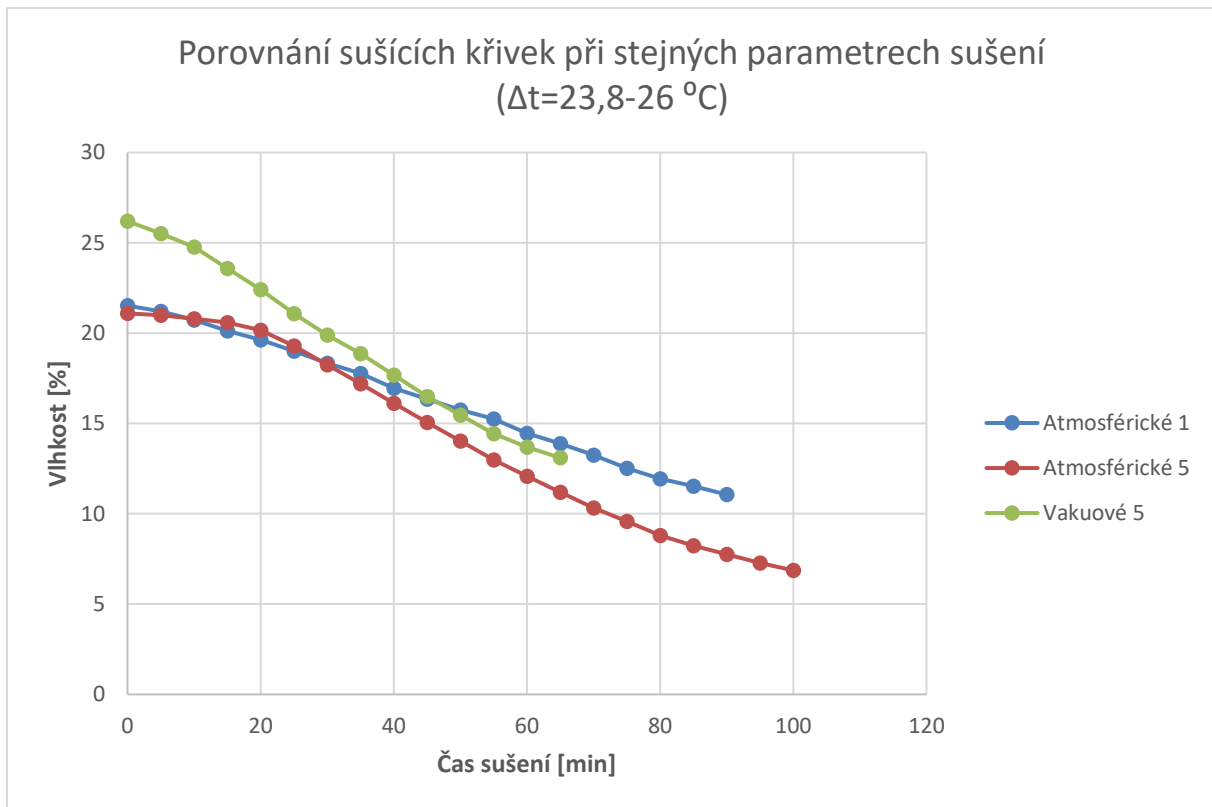
V grafu 10 jsou porovnána měření, které mají teplotní rozdíl mezi teplotou otopu a teplotou materiálu na výstupu ze sušárny v rozmezí $39-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z grafu je patrné, že všechna tři měření mají po 30 minutách sušení téměř totožnou vlhkost. Vlhkost materiálu se začíná vyrovnávat pro všechna tři měření po 20 minutách sušícího procesu a následný pokles vlhkosti u všech tří měření probíhá téměř totožně. To je způsobeno tím, že materiál se ohřeje a pak již sklon sušících křivek není pro jednotlivá měření tak rozdílný. Změna sklonu křivek by nastala, kdyby vstupní vlhkost materiálu byla pro všechna měření stejná.



Graf 10: Porovnání dle stejného $\Delta t= 39-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

9.3.6. Porovnání dle stejného $\Delta t= 23,8-26\text{ }^{\circ}\text{C}$

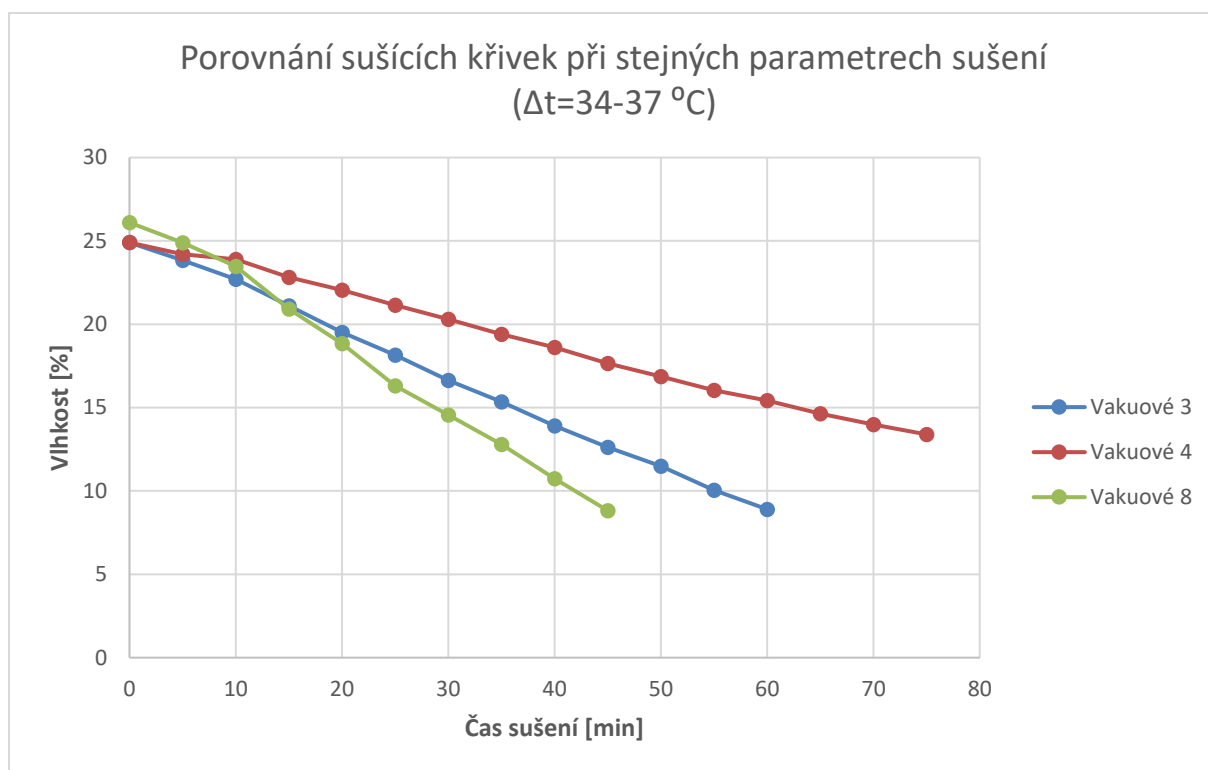
Další porovnání podle rozdílu teplot je provedeno pro teplotní rozdíl, který je v rozmezí od 23,8 do 26 $^{\circ}\text{C}$. Toto porovnání je v grafu 11. Je patrné, že při vakuovém měření 5 během prvních dvaceti minut dochází k rychlejšímu poklesu vlhkosti materiálu. Vlhkost materiálů při vakuovém měření 5 a atmosférickém měření 1 se vyrovnává po 45 minutách sušení. Vlhkost všech tří měření s tímto teplotním rozdílem se nejméně liší na 45. minutě sušení. Pokud by pro vakuové měření 5 byla stejná vstupní vlhkost materiálu jako pro měření atmosférické 1 a atmosférické 5, strmost sušící křivky měření vakuové 5 by se změnila.



Graf 11: Porovnání dle stejného $\Delta t= 23,8-26\text{ }^{\circ}\text{C}$

9.3.7. Porovnání dle stejného $\Delta t= 34-37\text{ }^{\circ}\text{C}$

Porovnání pro teplotní rozdíl od 34 do 37 °C je vytvořeno v grafu 12. V tomto rozsahu vyšla pouze vakuová měření 3; 4 a 8. Každé z těchto měření bylo měřeno s jiným zaplněním sušárny, ale dle teplotního rozdílu je možné je porovnat. Vlhkost materiálu je pro všechna tři měření téměř stejná pouze během prvních deseti minut sušení. Čím se doba sušení prodlužuje, tím větší rozdíly ve vlhkostech v daném čase můžeme pozorovat. Pokud bychom vynechali z vyhodnocení čas, za který se materiál ohřívá a čas, při kterém dochází k dosušení materiálu, sklon sušících křivek by se změnil. Je to způsobeno tím že čas pro ohřev materiálu a čas pro dosušení materiálu má na křivce sušení pozvolnější průběh.



Graf 12: Porovnání dle stejného $\Delta t= 34-37\text{ }^{\circ}\text{C}$

9.4. Vyhodnocení výsledků měření

Tato kapitola se zabývá shrnutím výsledků provedených měření sušení krmných směsí, a to jak atmosférických, tak vakuových. Hlavním cílem bylo prověření experimentálního zařízení, a správného postupu měření a vyhodnocení. Získané výsledky lze brát především jako předběžné. Slouží hlavně k návrhu optimálního typu sušení, jenž bude použito pro budoucí zkoušky.

Při měření byly sledovány parametry:

- teplota otopu sušárny
- zaplnění sušárny sušeným materiálem
- tlak – rozdíl mezi atmosférickým a vakuovým sušením

Z těchto parametrů je zpracováno vyhodnocení výsledků měření pro různé parametry.

9.4.1. Závislost teploty materiálu na teplotě otopu a teplotě sytosti

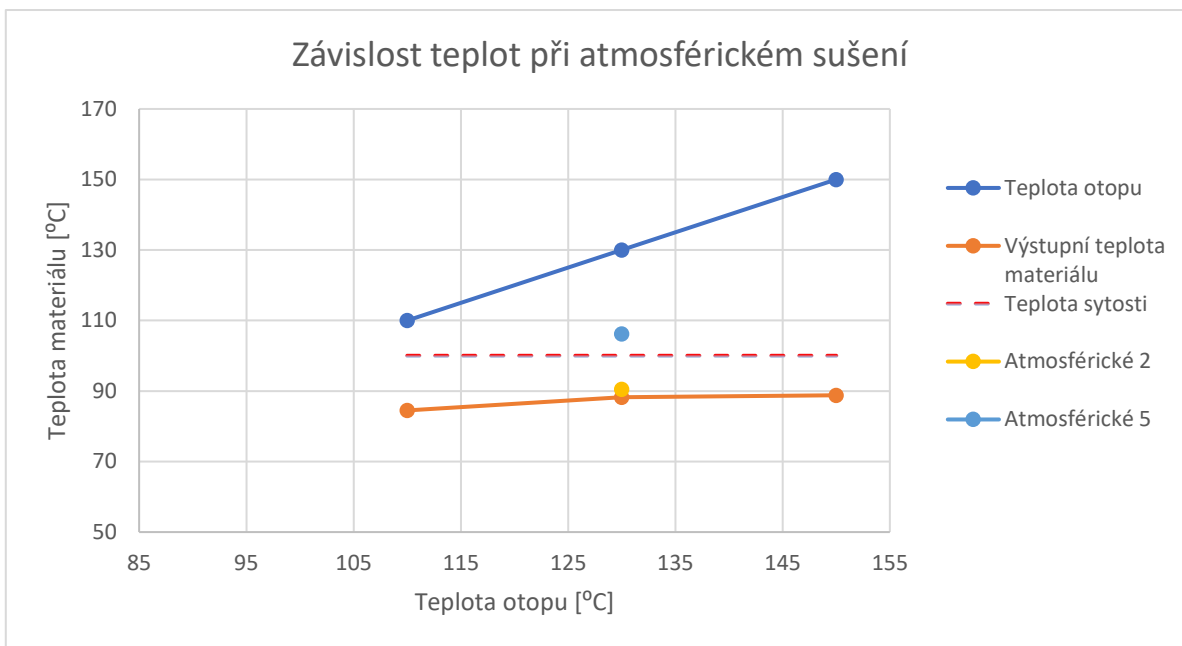
Do sušárny je vkládán materiál, který má vstupní vlhkost kolem 20-25 %. Cílem sušení je získat materiál s vlhkostí 8 %. V tomto důsledku je využito přibližně 30 % z celkové energie přivedené

pro vysušení materiálu na ohřev materiálu na teplotu, při které již dochází k sušení. Pokud by byl sušen materiál s vyšší vstupní vlhkostí, docházelo by k značnému zvyšování energetické náročnosti sušení.

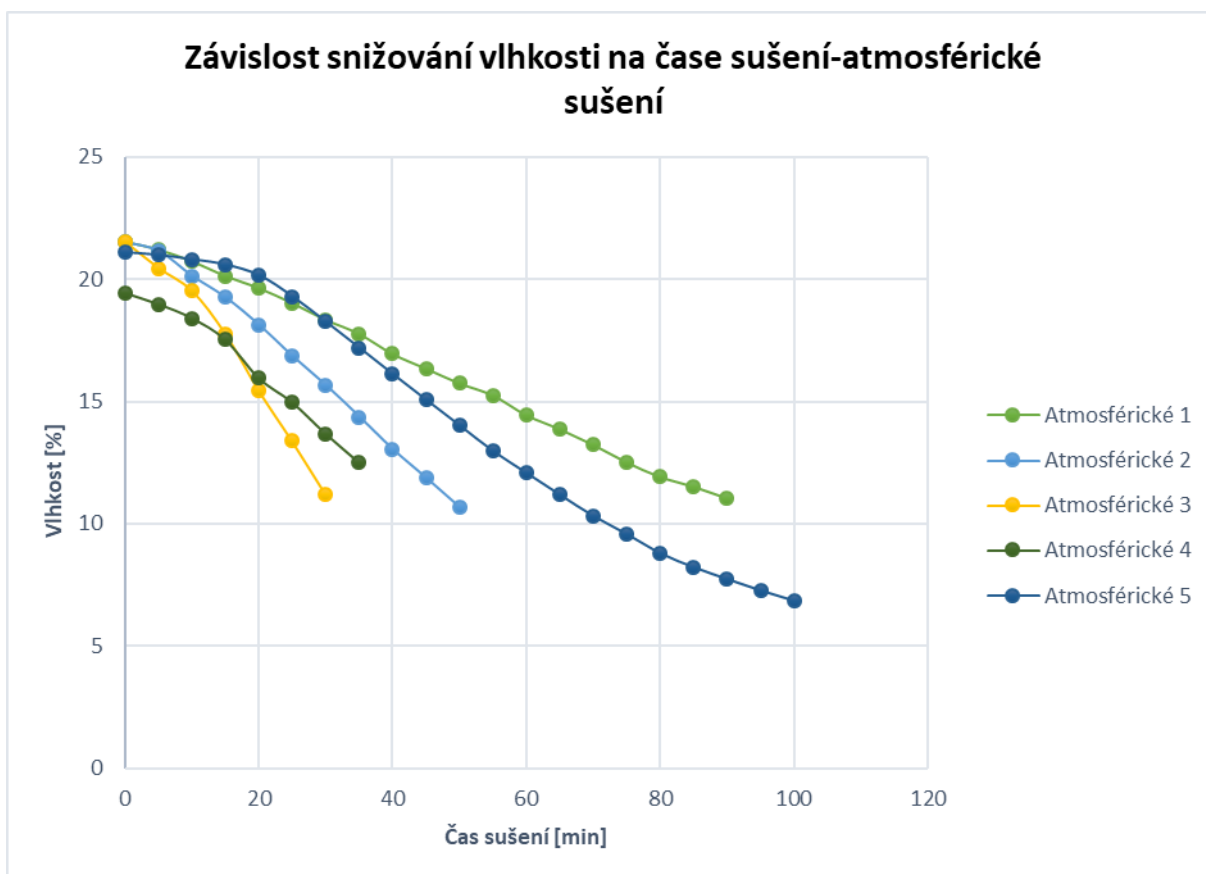
Pokud budeme sušit při atmosférickém tlaku, je nutné, aby teplota materiálu, která zajistí odpařování vody z materiálu byla vyšší, než teplota sytosti vody pro daný atmosférický tlak. Rozdíl těchto teplot není velký, ale při měření bylo zjištěno, že teplota materiálu je proti teplotě sytosti vodní páry nižší a po dosažení určité hodnoty se dále nezvyšuje. To je uvedeno v následujícím grafu 13, jenž znázorňuje výsledky měření při atmosférickém tlaku. V grafu 15 jsou výsledky pro vakuové měření s tlakem 0,2 bar. Je vidět že teplota materiálu je výrazně vyšší než teplota sytosti vodní páry a s teplotou otopu kontinuálně roste. Je to způsobeno nárůstem rozdílu mezi teplotou otopu a teplotou sytosti, přičemž se zvětšujícím se rozdílem klesá doba sušení.

V grafu 13 je vyvedena závislost teploty materiálu na teplotě otopu sušárny pro atmosférické sušení. Výsledná křivka je stanovena pro konstantní zaplnění sušárny 15 %. Jsou vyneseny body, jenž znázorňují výsledky měření atmosférického sušení 2 a 5. Výsledek měření atmosférické 2 se pro teplotu otopu 130 °C liší velmi nepatrně od křivky výstupní teploty materiálu. Výsledek měření atmosférické 5 se liší hlavně z důvodu jiného zaplnění, jelikož křivka je vytvořena pro zaplnění 15 % a měření atmosférické 5 probíhalo při zaplnění 45 %.

Je vidět, že při vyšším zaplnění má materiál při atmosférickém sušení vyšší teplotu. Pokud budeme zvětšovat zaplnění sušárny, bude se zároveň prodlužovat čas, za který se materiál vysuší. Při velkém zaplnění se materiál vysuší na minimální vlhkost a pak už nedochází k vysoušení materiálu ale pouze k ohřevu materiálu, přičemž se teplota materiálu může dostat i nad teplotu sytosti, jako u měření atmosférické 5, které trvalo 100 minut. Jak je zřejmé z grafu 14, při měření vakuové 5 ještě nebyla dosažena minimální vlhkost materiálu, což značí že pokud by měření pokračovalo, výstupní vlhkost materiálu by se ještě snížila. Ve srovnání s měřením atmosférické 2, které celé trvalo 50 minut byla stejná vlhkost materiálu dosažena při měření atmosférické 5 dosažena po cca 70 minutách. Tento časový rozdíl je způsoben změnou zaplnění sušárny.



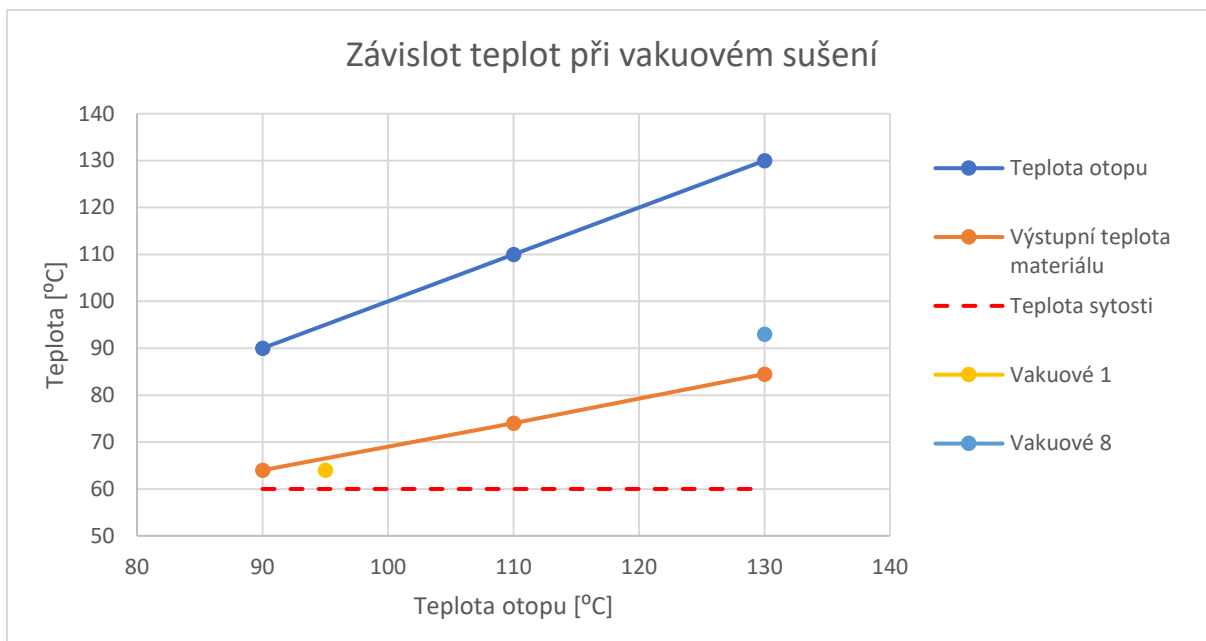
Graf 13: Závislost teploty materiálu na teplotě otopu a na teplotě sytosti při atmosférickém měření



Graf 14: Sušící křivky atmosférického sušení

V grafu 15 je vyvedena závislost teploty materiálu na teplotě otopu sušárny pro vakuové sušení. Křivka je stanovena pro zaplnění 15 % a pro tlak 0,2 bar. Další vynesené body ukazují změnu některého z parametrů. Pro měření vakuové 1 je sice teplota materiálu stejná jako pro bod, jenž znázorňuje měření vakuové 5 a tvoří křivku, ale při tomto měření se teplota otopu zvýšila na 95 °C a tlak byl 0,1 bar. Při měření vakuové 1 byl rozdíl mezi teplotou materiálu a teplotou sytosti pro tlak 0,1 bar 19 °C, a při měření vakuové 5 pro tlak 0,2 bar jen 4 °C. Pro měření vakuové 8 se teplota materiálu zvýšila z důvodu změny tlaku, jelikož při měření vakuové 8 byl tlak 0,475 bar. Rozdíl mezi teplotou materiálu a teplotou sytosti byl pro měření vakuové 8 13 °C a pro měření vakuové 7, jež tvoří křivku je tento rozdíl 24.5 °C.

Je možné konstatovat, že čím větší vytvoříme podtlak, tím menší bude mít materiál teplotu, což je výhodné pro sušení krmných směsí, kdy se snažíme, aby teplota materiálu nepřesáhla požadovanou hodnotu. Pokud budeme porovnávat měření vakuové 1 a vakuové 5, kterým začíná křivka výstupní teploty, je možné říci, že se změnou tlaku a tím i změnou teploty sytosti lze dosáhnout stejné teploty materiálu na výstupu ze sušárny. Vliv změny tlaku je možné popsat také jako rozdíl mezi teplotou otopu sušárny a teplotou sytosti při daném tlaku. Pro měření vakuové 1 činí rozdíl 50 °C a pro měření vakuové 5 pouze 30 °C. Za zvětšení rozdílu mezi teplotami materiálu a sytosti může rozdíl tlaků, při kterých byla měření prováděna. Úplně stejně lze chápat rozdíl mezi měřením vakuové 8 a vakuové 7, jímž končí křivka výstupní teploty materiálu. Pro měření vakuové 8, které má stejnou teplotu otopu, zaplnění sušárny a vstupní vlhkost materiálu, je rozdíl teploty materiálu na výstupu ze sušárny způsoben změnou tlaku. Tato změna tlaku má vliv i na rozdíl teplot materiálu a teploty sytosti, který je pro měření vakuové 7 70 °C a pro měření vakuové 8 50 °C.

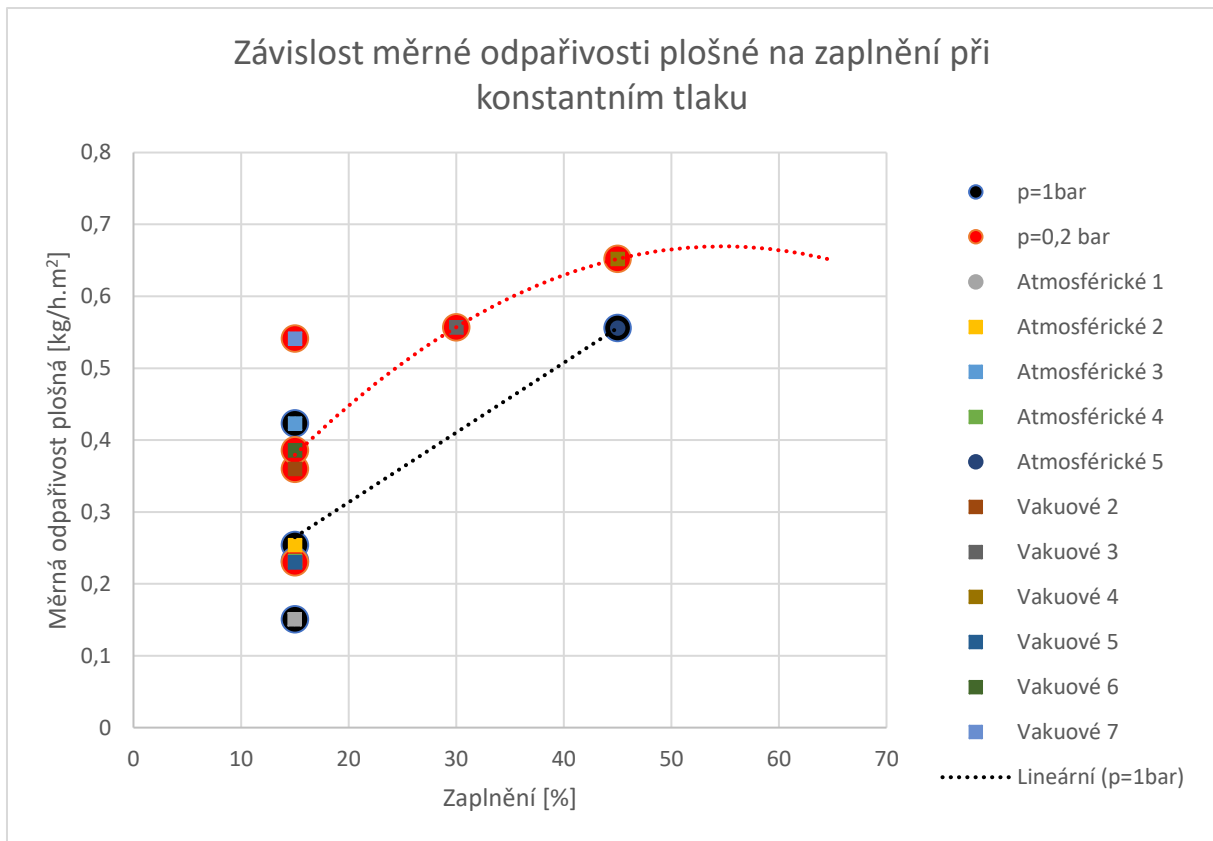


Graf 15: Závislost teploty materiálu na teplotě otopu a na teplotě sytosti při vakuovém měření

9.4.2. Závislost měrné odpařivosti plošné na zaplnění při konstantním tlaku

Měrná odpařivost plošná je pro námi prováděné měření jedním z nejdůležitějších parametrů. Po získání této hodnoty jsme schopni navrhnout rozměry sušárny. Pro každé měření se tato hodnota liší, a to díky změně teploty otopu sušárny či různé vstupní vlhkosti materiálu. Při porovnání sušení atmosférického a vakuového lze říci, že hodnoty měrných odpařivostí plošných, při stejném zaplnění jsou vyšší pro sušení vakuové, jak je znázorněno v grafu 16.

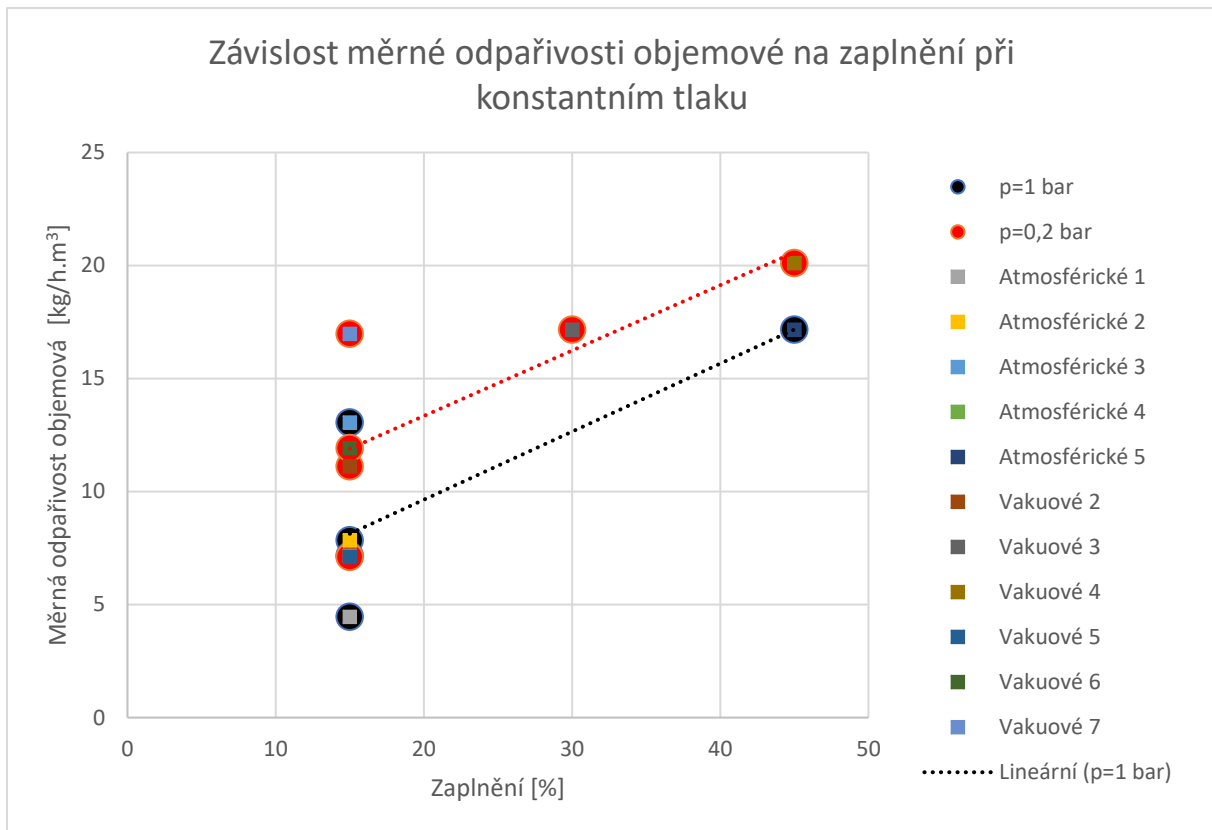
Vyhodnocením výsledků atmosférických měření vznikla křivka pro atmosférické sušení. Ke křivce přiléhají měření atmosférické 2, které je pro zaplnění 15 %, a atmosférické 4 jenž je pro zaplnění 45 %. Pro zaplnění 15 % jsou vyneseny ještě měření atmosférické 1 a atmosférické 3. Rozdíl mezi měření atmosférické 1 a atmosférické 2 vzniká kvůli jiné teplotě otopu sušárny. Pro měření atmosférické 1 byl otop 110 °C a pro měření atmosférické 2 130 °C. Tyto rozdílné teploty otopů způsobují nejen změnu hodnoty měrné odpařivosti plošné ale i rozdíl v parametru Δt , jenž značí rozdíl teploty otopu sušárny a teploty sytosti. Pokud porovnáme měření atmosférické 2 a atmosférické 3, dojdeme ke stejnému závěru, jen s tím rozdílem že u měření atmosférické 3 je vyšší hodnota měrné odpařivosti plošné způsobena zvýšením teploty otopu, a to z původních 130 °C na teplotu 150 °C a zároveň se tím mění parametr Δt . Všechny ostatní parametry byly při měřeních konstantní. Z grafu 3 je patrné, že optimální zaplnění pro vakuové sušení by bylo cca 50 %.



Graf 16: Závislost měrné odpařivosti plošné na zaplnění při konstantním tlaku

Při uvažování měrné odpařivosti objemové lze říci, že dosáhneme při vakuovém sušení lepších výsledků než při sušení atmosférickém, jak je možné vidět na grafu 17. Tento graf je uváděn pro případ porovnání měrné odpařivosti plošné a objemové. Měrná objemová odpařivost není u kontaktního sušení brána jako hlavní parametr. Měrná odpařivost objemová je hlavním parametrem pro návrh sušícího zařízení u sušení konvektivního.

Byla zde vyhodnocována stejná měření jako u vyhodnocení závislosti měrné odpařivosti plošné na změně zaplnění a odlišnost mezi jednotlivými měřeními je způsobena stejnými změnami parametrů jako pro vyhodnocení grafu 16.



Graf 17: Závislost měrné odpařivosti objemové na zaplnění při konstantním tlaku

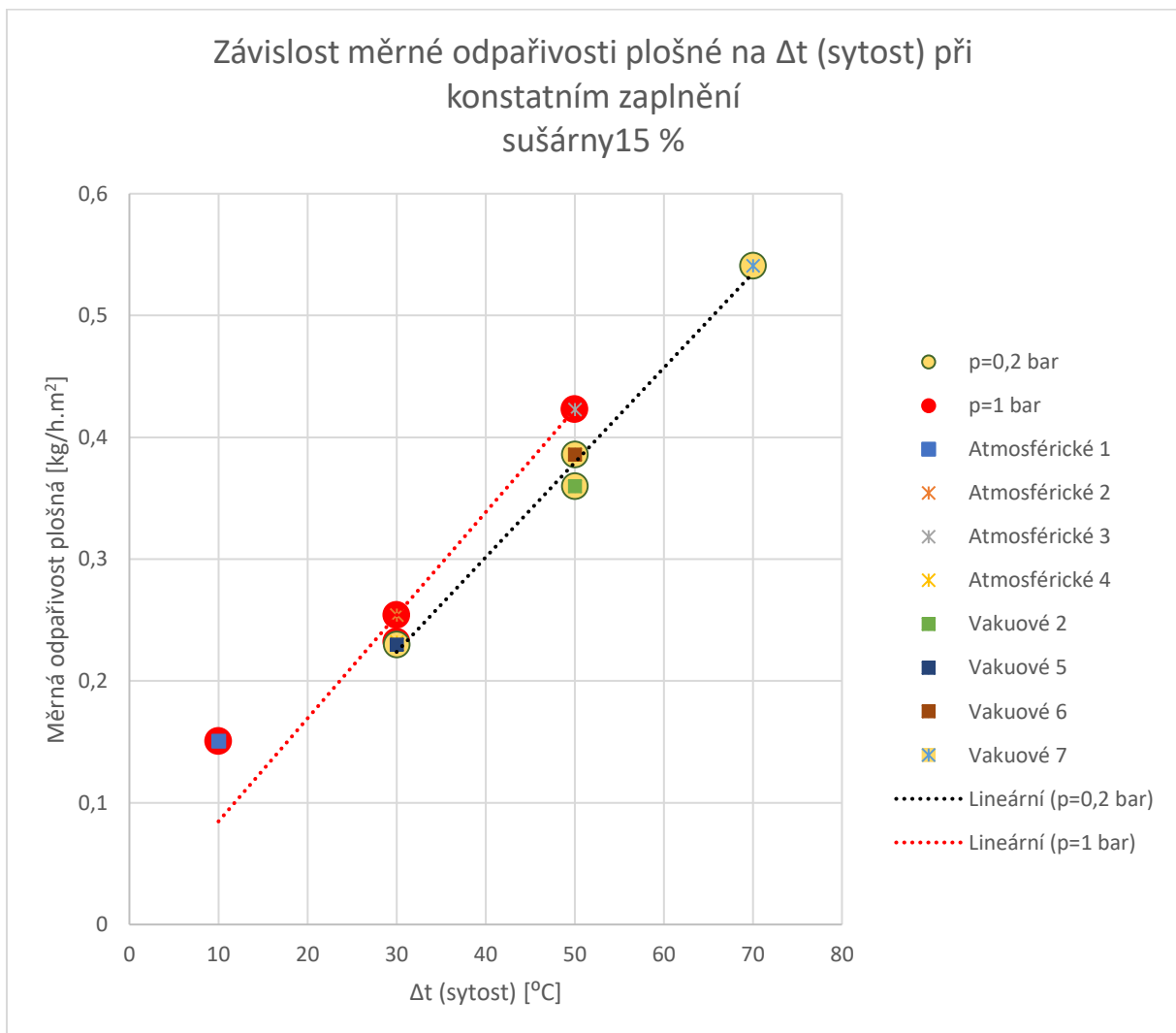
9.4.3. Závislost měrné odpařivosti plošné na Δt (syty) při konstantním zaplnění sušárny 15 %

Pro lepší pochopení sušicího procesu jsme vytvořili z výsledků měření závislost měrné odpařivosti plošné na Δt (syty) pro konstantní zaplnění sušárny 15 %. Δt je v tomto případě bráno jako rozdíl mezi teplotou otopu sušárny a teplotou syty vodní páry při daném tlaku. Výsledná závislost je ukázána v grafu 18. Z grafu 18 je patrný rozdíl mezi měrnými odpařivostmi plošnými pro atmosférické a vakuové sušení.

Pro vyhodnocení atmosférického měření byly použity výsledky měření atmosférické 1, atmosférické 2, atmosférické 3 a atmosférické 4. Každé měření je v grafu vyneseno jako a následně byly body proloženy přímkou. Z grafu je možné vidět, že měření atmosférické 1 je od křivky více vzdáleno. I přes nižší teplotu otopu sušárny a tím i nižší rozdíl mezi teplotami otopu a syty vyšla měrná odpařivost plošná vyšší než je předpokládaná hodnota, kterou ukazuje křivka pro atmosférické sušení.

Stejně jsou vyneseny body, jenž znázorňují vakuové měření vakuové 2, vakuové 5, vakuové 6 a vakuové 7. Měření vakuové 5, jenž má Δt stejné jako měření atmosférické 4, má téměř stejnou

hodnotu měrné odpařivosti plošné, a to i přesto, že rozdíl mezi teplotami otopu pro tyto dvě měření je 40 °C. I v tomto případě je hlavním faktorem tlak uvnitř sušárny, jelikož při snížení tlaku v sušárně nepotřebuji stejnou teplotu otopu u atmosférického a vakuového sušení, abych dosáhl stejné měrné odpařivosti plošné. Pro křivku vakuového sušení se ostatní body výrazněji neliší. Možný rozdíl mezi měřeními vakuové 2 a vakuové 6 je způsoben rozdílnou vlhkostí materiálu na vstupu do sušárny, jelikož ostatní parametry byly stejné pro obě měření. Rozdíl mezi vakuovými měřeními a atmosférickým měřením 3 při $\Delta t=50$ °C je určen jak teplotou otopu sušárny při atmosférické 3, která byla 150 °C, ale také rozdílnou vstupní vlhkostí materiálu. Nejvyšší hodnoty měrné odpařivosti plošné jsme dosáhli při měření vakuové 7, při kterém byl největší rozdíl mezi teplotou otopu a teplotou sytosti.

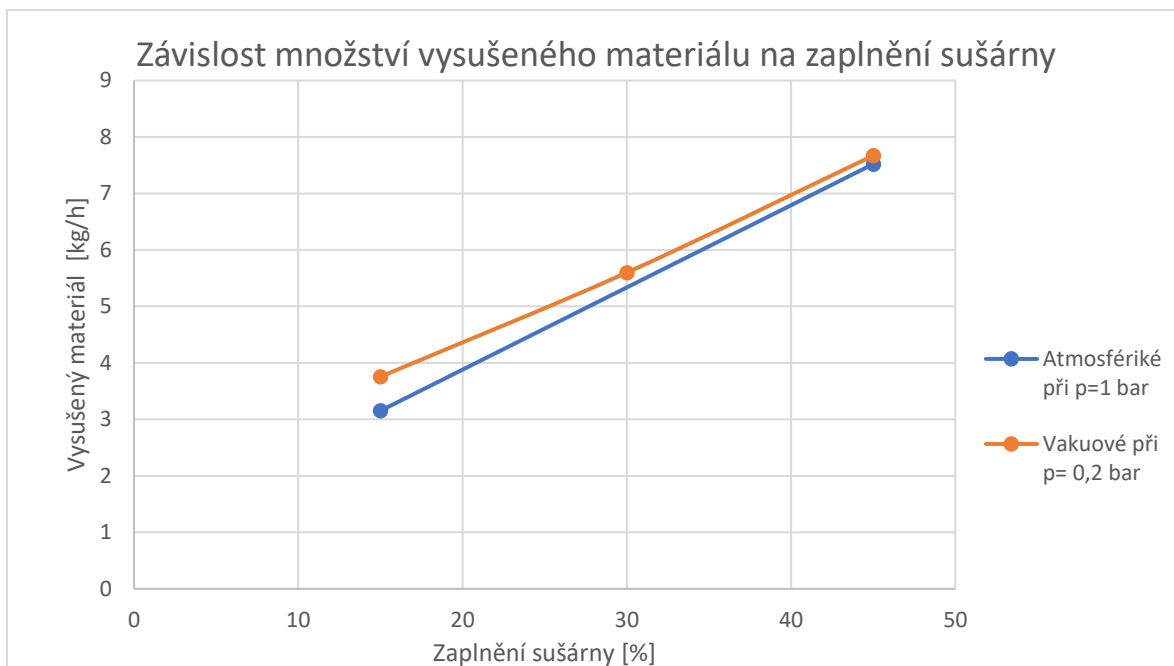


Graf 18: Závislost měrné odpařivosti plošné na Δt (sytost) při konstantním zaplnění sušárny 15 %

9.4.4. Závislost množství vysušeného materiálu na zaplnění sušárny

Při uvažování optimální efektivity sušení je důležitým parametrem zaplnění objemu sušárny. Z výsledků měření lze vidět, že s rostoucím zaplněním se doba sušení prodlužuje. Velmi důležitým výsledkem měření je určení, kolik usušeného materiálu se povede vyprodukovat při daném zaplnění sušárny při stejném čase sušení. Přesný výsledek není možné dopředu určit, jelikož proces sušení je závislý na několika parametrech, a dá se předpokládat dosažení ideální hodnoty pro dané podmínky sušení, kterými jsou otop sušárny, jenž zajišťuje přívod tepla k materiálu, a různá úroveň zaplnění sušárny. Pro potvrzení této úvahy bylo měření vyhodnoceno do grafu 19, na němž je porovnání závislosti množství vysušeného materiálu na zaplnění sušárny.

Výsledky měření jsou brány pro konstantní podmínky sušení, kterými jsou teplota otopu a tlak uvnitř sušárny. Měnilo se pouze zaplnění. Pro atmosférické sušení byly tyto parametry shodné pro měření atmosférické 2 a atmosférické 5 a při vakuovém sušení jsou stejné parametry u měření vakuové 2, vakuové 3 a vakuové 4. Výsledky jsou přepočteny na množství vyprodukovaného usušeného materiálu za 1 hodinu a jsou vyneseny v grafu 19. Jestliže se při vyhodnocení změnil výchozí parametr teploty otopu za rozdíl mezi teplotou otopu a teplotou sytosti, typy měření s původními konstantními parametry a měření s nově zvolenými konstantními parametry se dle výsledků měření nezmění. Při tvorbě křivek pro nově zvolené parametry by došlo k překrytí s křivkami, které jsou již v grafu 19. Křivka atmosférického sušení odpovídá křivce pro rozdíl mezi teplotou otopu a teplotou sytosti 30 °C a křivka vakuového sušení by odpovídala rozdílu teplot 50 °C. Pro měření atmosférického sušení se zaplněním sušárny 30 % nejsou výsledky, jelikož při provádění experimentu došlo k poruše na měřicím zařízení a toto měření tak nebylo možno provést.



Graf 19: Závislost množství vysušeného materiálu na zaplnění sušárny

Z grafu 19 je patrné, že při zvyšování zaplnění sušárny roste produkce vysušeného materiálu. Znamená to, že hodnota optimálního zaplnění sušárny s maximální produkcí materiálu zatím nebyla dosažena.

10. Závěr

Tato práce se zabývá porovnáním výsledků měření atmosférického a vakuového sušení. V první části se práce zaměřuje na popis sušícího procesu. Jsou zde popsány různé vlastnosti, které ovlivňují sušení materiálu. V následující kapitole jsou popsány typy sušáren. V kapitolách 7 a 8 je zpracováno rozdělení typů vakuové techniky, které se používá pro vytvoření podtlaku. Dále následuje popis měření a uvedení parametrů, při kterých probíhala atmosférická a vakuová měření. Jsou zde uvedeny vypočtené hodnoty měrných odpařivostí plošných a objemových, teploty materiálu na výstupu ze sušárny a hmotnost odpařené vody pro každé měření. Z těchto výsledků jsou následně vytvořeny sušící křivky pro atmosférické a vakuové sušení a dále jsou vytvořeny sušící křivky pro měření, která měla stejné vstupní parametry. Těmito parametry je myšlena teplota otopu sušárny, úroveň zaplnění a rozdíl mezi teplotou otopu a teplotou sytosti. V poslední podkapitole jsou vytvořeny závislosti pro vyhodnocení a porovnání atmosférického a vakuového měření. Jsou zde závislosti teploty materiálu na teplotě otopu, a to jak pro měření atmosférického sušení, tak pro měření vakuového sušení. Dalším vyhodnocením je porovnání závislosti měrné odpařivosti plošné a objemové na úrovni zaplnění při konstantním tlaku a závislost měrné odpařivosti plošné na rozdílu teplot otopu a sytosti při konstantním zaplnění. Posledním vyhodnocením je vytvořena závislost množství vysušeného materiálu na úrovni zaplnění sušárny. Z výsledků měření lze konstatovat, že pro sušení krmných směsí je lepší zvolit sušárnu, která je nastavena pro vakuové sušení. Hlavním důvodem jsou vyšší hodnoty měrné odpařivosti plošné, možnost regulace teploty materiálu změnou tlaku uvnitř sušárny, kratší doba sušení při stejných vstupních parametrech a vyšší produkce vysušeného materiálu při stejném zaplnění sušárny. V příloze 1 jsou uvedeny vyhodnocení výsledků vlhkosti materiálu ze speciální sušárny a dále je zde uvedena spotřeba elektrické energie na otop kampaňovité sušárny pro každé měření.

Seznam použité literatury:

- [1] PASTOREK Zdeněk, KÁRA Jaroslav, JEVIČ Petr, *Biomasa: obnovitelný zdroj energie*, FCC PUBLIC 2004, ISBN 80-86534-06-5.
- [2] OCHODEK, Tadeáš, Jan KOLONIČNÝ a Pavel JANÁSEK. *Potenciál biomasy, druhy, bilance a vlastnosti paliv z biomasy* [online]., 7-187 [cit. 2.5.2019]. Dostupné z www: <http://www.biomasa-info.cz/cs/doc/bio.pdf>
- [3] DLOUHÝ, Vojtěch. *Návrh elektrárny se sušením biomasy*. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Dlouhý CSc.
- [4] STRAKA, L. *Sušení biomasy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 43 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
- [5] UTĚŠIL, Tomislav. *Suška na biomasu* [online]. [cit. 10.5.2019]. Dostupný na WWW: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/suska-na-biomasu>
- [6] ŠESTÁK, Jiří a Rudolf ŤITNÝ. *Tepelné pochody II: výměníky tepla, odpařování, sušení, průmyslové pece a elektrický ohřev*. Vyd. 2. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03475-5.
- [7] MUJUMDAR, Arun S. *Handbook of industrial drying*. 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis, c2007. ISBN 978-1574446685.
- [8] GRDZELIŠVILI, Gulnara Ing. *Sušení rostlinných materiálů* [online]. [cit. 10.5.2019]. Dostupný na WWW: <http://chps.fsid.cvut.cz/pt2010/pdf/GrdzelisviliGulnara.pdf>
- [9] JUNEK, J. *Konstrukční návrh průmyslové sušárny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 140 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Novotný.
- [10] ŠNITA, Dalimil. *Chemické inženýrství I*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2005. ISBN 80-7080-589-7.
- [11] VAKUUM BOHEMIA: *Produkty* [online]. © 2019 [cit. 10.5.2019]. Dostupný na WWW: <https://www.vakuum-bohemia.cz/vyvevy>
- [12] ERBEN, Milan Ing., Ph.D. *Vakuová technika* [online]. [cit. 12.5.2019]. Dostupný na WWW: https://www.upce.cz/sites/default/binary_www_old/fcht/koanch/soubory/vakuum-erben.pdf

- [13] NEUVEDEN. *Fyzikální pokusy.cz* [online]. [cit. 12.5.2019]. Dostupný na WWW:
<http://fyzikalnipokusy.cz/1671/zavislost-teploty-varu-vody-na-tlaku>
- [14] NEUVEDEN. *Agrojournal.cz* [online]. [cit. 2.5.2019]. Dostupný na WWW:
<https://www.agrojournal.cz/clanky/vyrobni-technologie-a-mechanizace-pri-pestovani-a-sklizni-chmele-212>
- [15] NEUVEDEN. *Lat.zshk.cz* [online]. [cit. 2.5.2019]. Dostupný na WWW:
https://lat.zshk.cz/media.aspx?id=FLT025&TB_iframe=true&height=750&width=753
- [16] NEUVEDEN. *Lat.zshk.cz* [online]. [cit. 2.5.2019]. Dostupný na WWW:
https://lat.zshk.cz/media.aspx?id=FLT026&TB_iframe=true&height=750&width=444
- [17] ŠNITA. <https://vydavatelstvi.vscht.cz/> [online]. 2006 [cit. 2.5.2019]. Dostupný na WWW: http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-589-7/pdf/259.pdf
- [18] KROUPA, z. Sušení biomasy. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 37 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marek Baláš, Ph.D.
- [19] NEUVEDEN, Autor. Osmoanabiosa. [OBRÁZEK]. [vid. 2.5.2019]. Dostupné z WWW:
<http://docplayer.cz/45407327-Osmoanabiosa-princip-osmoanabiosy-aktivita-vody-aktivitavody-aktivita-vody-vodni-aktivita-aktivita-vody.html>
- [26] SÝKORA, Jáchym; SKŘIVAN, Tomáš. *Slideplayer.cz* [online]. [cit. 2.5.2019].
Dostupný na WWW: <https://player.slideplayer.cz/10/2903793/data/images/img12.jpg>

Příloha 1

Atmosférické sušení

Speciální sušárna	Surový materiál-vlhčí		
Název misky	4	C	12
Hmotnost misky [g]	45,189	40,271	39,256
Hmotnost misky se vzorkem [g]	66,634	60,028	56,607
Hmotnost misky se sušinou [g]	62,025	55,742	52,897
Hmotnost vzorku [g]	21,445	19,757	17,351
Hmotnost sušiny [g]	16,836	15,471	13,641
Obsah vody [%]	21,49219	21,69358	21,38205
Průměrný obsah vody [%]	21,5226064		

Tabulka 5: Výsledky měření počátečního stavu sušeného materiálu (atmosférické sušení)

Kampaňovitá sušárna	Měření 1: t=110°C; V=15 %; W=21,5 %		
Název misky	7	3	5
Hmotnost misky [g]	41,023	40,847	41,327
Hmotnost misky se vzorkem [g]	62,988	62,615	63,453
Hmotnost misky se sušinou [g]	61,296	60,95	61,76
Hmotnost vzorku [g]	21,965	21,768	22,126
Hmotnost sušiny [g]	20,273	20,103	20,433
Obsah vody [%]	7,703164	7,648842	7,651632
Průměrný obsah vody [%]	7,667879342		
Elektrina pro ohřev sušárny [kWh]	0,9		

Tabulka 6: Výsledky měření sušeného materiálu při t=110°C; V=15 %; W=21,5 % (atmosférické sušení)

Kampaňovitá sušárna	Měření 2: t=130°C; V=15 %; W=21,5 %		
Název misky	5	3	12
Hmotnost misky [g]	41,318	40,841	39,244
Hmotnost misky se vzorkem [g]	61,308	60,043	62,983
Hmotnost misky se sušinou [g]	59,845	58,637	61,274
Hmotnost vzorku [g]	19,99	19,202	23,739
Hmotnost sušiny [g]	18,527	17,796	22,03
Obsah vody [%]	7,318659	7,322154	7,199124
Průměrný obsah vody [%]	7,279979026		
Elektrina pro ohřev sušárny [kWh]	0,741		

Tabulka 7: Výsledky měření sušeného materiálu při t=130°C; V=15 %; W=21,5 % (atmosférické sušení)

Kampaňovitá sušárna	Měření 3: t=150°C; V=15 %; W=21,5 %		
Název misky	7	3	C
Hmotnost misky [g]	41,023	40,841	40,271
Hmotnost misky se vzorkem [g]	63,967	65,99	63,434
Hmotnost misky se sušinou [g]	62,133	64,133	61,654
Hmotnost vzorku [g]	22,944	25,149	23,163
Hmotnost sušiny [g]	21,11	23,292	21,383
Obsah vody [%]	7,993375	7,383991	7,68467
Průměrný obsah vody [%]	7,687345367		
Elektrina pro ohřev sušárny [kWh]	0,799		

Tabulka 8: Výsledky měření sušeného materiálu při t=150°C; V=15 %; W=21,5 % (atmosférické sušení)

Speciální sušárna	Surový materiál-suší		
Název misky	7	4	C
Hmotnost misky [g]	41,023	45,189	40,271
Hmotnost misky se vzorkem [g]	64,492	68,76	58,089
Hmotnost misky se sušinou [g]	59,859	64,137	54,714
Hmotnost vzorku [g]	23,469	23,571	17,818
Hmotnost sušiny [g]	18,836	18,948	14,443
Obsah vody [%]	19,74093	19,61308	18,94152
Průměrný obsah vody [%]	19,43184618		

Tabulka 9: Výsledky měření počátečního stavu sušeného materiálu-suší (atmosférické sušení)

Kampaňovitá sušárna	Měření 4: t=130°C; V=15 %; W=19,4 %		
Název misky	1	BEZ	10
Hmotnost misky [g]	45,212	46,004	42,741
Hmotnost misky se vzorkem [g]	67,726	66,222	62,354
Hmotnost misky se sušinou [g]	66,179	64,797	60,973
Hmotnost vzorku [g]	22,514	20,218	19,613
Hmotnost sušiny [g]	20,967	18,793	18,232
Obsah vody [%]	6,87128	7,048175	7,041248
Průměrný obsah vody [%]	6,986901046		
Elektrina pro ohřev sušárny [kWh]	0,689		

Tabulka 10: Výsledky měření sušeného materiálu při t=130°C; V=15 %; W=19,4 % (atmosférické sušení)

Speciální sušárna	Surový materiál-druhý den měření		
Název misky	BEZ	1	10
Hmotnost misky [g]	46,003	45,212	42,741
Hmotnost misky se vzorkem [g]	63,969	63,457	59,54
Hmotnost misky se sušinou [g]	60,143	59,684	55,961
Hmotnost vzorku [g]	17,966	18,245	16,799
Hmotnost sušiny [g]	14,14	14,472	13,22
Obsah vody [%]	21,29578	20,67964	21,30484
Průměrný obsah vody [%]	21,09341958		

Tabulka 11: Výsledky měření počátečního stavu sušeného materiálu-druhý den měření (atmosférické sušení)

Kampaňovitá sušárna	Měření 5: t=130°C; V=45 %; W=21,1 %		
Název misky	3	C	7
Hmotnost misky [g]	40,845	40,27	41,024
Hmotnost misky se vzorkem [g]	65,26	62,378	65,343
Hmotnost misky se sušinou [g]	64,234	61,473	64,392
Hmotnost vzorku [g]	24,415	22,108	24,319
Hmotnost sušiny [g]	23,389	21,203	23,368
Obsah vody [%]	4,202335	4,093541	3,910523
Průměrný obsah vody [%]	4,068799356		
Elektrina pro ohřev sušárny [kWh]	1,88		

Tabulka 12: Výsledky měření sušeného materiálu-druhý den měření při t=130°C; V=45 %; W=21,5 % (atmosférické sušení)

Vakuové sušení

Speciální sušárna	Surový materiál – první den měření		
Název misky	0	1	2
Hmotnost misky [g]	46,971	41,448	40,19
Hmotnost misky se vzorkem [g]	69,176	64,138	61,657
Hmotnost misky se sušinou [g]	63,329	58,066	55,893
Hmotnost vzorku [g]	22,205	22,69	21,467
Hmotnost sušiny [g]	16,358	16,618	15,703
Obsah vody [%]	26,33191	26,76069	26,85051
Průměrný obsah vody [%]	26,64770317		

Tabulka 13: Výsledky měření počátečního stavu sušeného materiálu-první den měření (vakuové sušení)

Kampaňovitá sušárna	Měření 1: t=95°C; V=15 %; W=26,6 %, p=0,1 bar		
Název misky	A	C	16
Hmotnost misky [g]	41,651	40,269	40,369
Hmotnost misky se vzorkem [g]	61,937	61,015	63,325
Hmotnost misky se sušinou [g]	59,782	58,797	60,778
Hmotnost vzorku [g]	20,286	20,746	22,956
Hmotnost sušiny [g]	18,131	18,528	20,409
Obsah vody [%]	10,62309	10,69122	11,09514
Průměrný obsah vody [%]	10,80314864		
Elektrina pro ohřev sušárny [kWh]	0,7		

Tabulka 14: Výsledky měření sušeného materiálu při t=95°C; V=15 %; W=26,6 %; p=0,1 bar (vakuové sušení)

Speciální sušárna	Surový materiál – druhý den měření		
Název misky	0	1	2
Hmotnost misky [g]	46,967	41,446	40,19
Hmotnost misky se vzorkem [g]	70,655	65,706	64,201
Hmotnost misky se sušinou [g]	64,895	59,635	58,134
Hmotnost vzorku [g]	23,688	24,26	24,011
Hmotnost sušiny [g]	17,928	18,189	17,944
Obsah vody [%]	24,31611	25,02473	25,26759
Průměrný obsah vody [%]	24,86947573		

Tabulka 15: Výsledky měření počátečního stavu sušeného materiálu-druhý den měření (vakuové sušení)

Kampaňovitá sušárna	Měření 2: t=110°C; V=15 %; W=24,9 %, p=0,2 bar		
Název misky	11	15	4
Hmotnost misky [g]	39,287	42,233	45,189
Hmotnost misky se vzorkem [g]	61,29	64,099	72,165
Hmotnost misky se sušinou [g]	58,358	61,229	68,645
Hmotnost vzorku [g]	22,003	21,866	26,976
Hmotnost sušiny [g]	19,071	18,996	23,456
Obsah vody [%]	13,32546	13,1254	13,04864
Průměrný obsah vody [%]	13,1664972		
Elektrina pro ohřev sušárny [kWh]	0,735		

Tabulka 16: Výsledky měření sušeného materiálu při t=110°C; V=15 %; W=24,9 %; p=0,2 bar (vakuové sušení)

Kampaňovitá sušárna	Měření 3: t=110°C; V=30 %; W=24,9 %, p=0,2 bar		
Název misky	A	C	16
Hmotnost misky [g]	41,653	40,27	40,37
Hmotnost misky se vzorkem [g]	67,505	65,572	69,616
Hmotnost misky se sušinou [g]	65,105	63,215	66,94
Hmotnost vzorku [g]	25,852	25,302	29,246
Hmotnost sušiny [g]	23,452	22,945	26,57
Obsah vody [%]	9,283614	9,315469	9,149969
Průměrný obsah vody [%]	9,24968426		
Elektrina pro ohřev sušárny [kWh]	1,502		

Tabulka 17: Výsledky měření sušeného materiálu při t=110°C; V=30 %; W=24,9 %; p=0,2 bar (vakuové sušení)

Kampaňovitá sušárna	Měření 4: t=110°C; V=45 %; W=24,9 %, p=0,2 bar		
Název misky	2	4	11
Hmotnost misky [g]	40,191	45,188	39,294
Hmotnost misky se vzorkem [g]	72,75	73,064	66,843
Hmotnost misky se sušinou [g]	70,462	71,072	64,845
Hmotnost vzorku [g]	32,559	27,876	27,549
Hmotnost sušiny [g]	30,271	25,884	25,551
Obsah vody [%]	7,027243	7,145932	7,252532
Průměrný obsah vody [%]	7,141902229		
Elektrina pro ohřev sušárny [kWh]	2,104		

Tabulka 18: Výsledky měření sušeného materiálu při T=110°C; V=45 %; W=24,9 %; p=0,2 bar (vakuové sušení)

Speciální sušárna	Surový materiál – třetí den měření		
Název misky	11	2	4
Hmotnost misky [g]	39,296	40,192	45,187
Hmotnost misky se vzorkem [g]	60,881	61,643	66,041
Hmotnost misky se sušinou [g]	55,221	56,084	60,573
Hmotnost vzorku [g]	21,585	21,451	20,854
Hmotnost sušiny [g]	15,925	15,892	15,386
Obsah vody [%]	26,22191	25,91488	26,22039
Průměrný obsah vody [%]	26,1190595		

Tabulka 19: Výsledky měření počátečního stavu sušeného materiálu-třetí den měření (vakuové sušení)

Kampaňovitá sušárna	Měření 5: t=90°C; V=15 %; W=26,1 %, p=0,2 bar		
Název misky	A	C	16
Hmotnost misky [g]	41,653	40,27	40,371
Hmotnost misky se vzorkem [g]	64,936	64,245	63,689
Hmotnost misky se sušinou [g]	62,008	61,27	60,732
Hmotnost vzorku [g]	23,283	23,975	23,318
Hmotnost sušiny [g]	20,355	21	20,361
Obsah vody [%]	12,5757	12,40876	12,68119
Průměrný obsah vody [%]	12,55521621		
Elektrina pro ohřev sušárny [kWh]	0,76		

Tabulka 20: Výsledky měření sušeného materiálu při t=90°C; V=15 %; W=26,1 %; p=0,2 bar (vakuové sušení)

Kampaňovitá sušárna	Měření 6: t=110°C; V=15 %; W=26,1 %, p=0,2 bar		
Název misky	1	0	15
Hmotnost misky [g]	41,449	46,973	42,231
Hmotnost misky se vzorkem [g]	64,06	71,663	65,56
Hmotnost misky se sušinou [g]	61,744	69,248	63,355
Hmotnost vzorku [g]	22,611	24,69	23,329
Hmotnost sušiny [g]	20,295	22,275	21,124
Obsah vody [%]	10,2428	9,781288	9,451755
Průměrný obsah vody [%]	9,825281824		
Elektrina pro ohřev sušárny [kWh]	0,861		

Tabulka 21: Výsledky měření sušeného materiálu při t=110°C; V=15 %; W=26,1 %; p=0,2 bar (vakuové sušení)

Kampaňovitá sušárna	Měření 7: t=130°C; V=15 %; W=26,1 %, p=0,2 bar		
Název misky	C	2	4
Hmotnost misky [g]	40,272	40,19	45,189
Hmotnost misky se vzorkem [g]	64,78	65,91	72,621
Hmotnost misky se sušinou [g]	62,839	63,924	70,526
Hmotnost vzorku [g]	24,508	25,72	27,432
Hmotnost sušiny [g]	22,567	23,734	25,337
Obsah vody [%]	7,919863	7,721617	7,637066
Průměrný obsah vody [%]	7,759515507		
Elektrina pro ohřev sušárny [kWh]	1,04		

Tabulka 22: Výsledky měření sušeného materiálu při t=130°C; V=15 %; W=26,1 %; p=0,2 bar (vakuové sušení)

Kampaňovitá sušárna	Měření 8: t=130°C; V=15 %; W=26,1 %, p=0,475 bar		
Název misky	11	16	A
Hmotnost misky [g]	39,297	40,371	41,653
Hmotnost misky se vzorkem [g]	65	64,909	66,717
Hmotnost misky se sušinou [g]	63,042	62,968	64,819
Hmotnost vzorku [g]	25,703	24,538	25,064
Hmotnost sušiny [g]	23,745	22,597	23,166
Obsah vody [%]	7,617788	7,91018	7,572614
Průměrný obsah vody [%]	7,700194015		
Elektrina pro ohřev sušárny [kWh]	0,97		

Tabulka 23: Výsledky měření sušeného materiálu při t=130°C; V=15 %; W=26,1 %; p=0,475 bar (vakuové sušení)