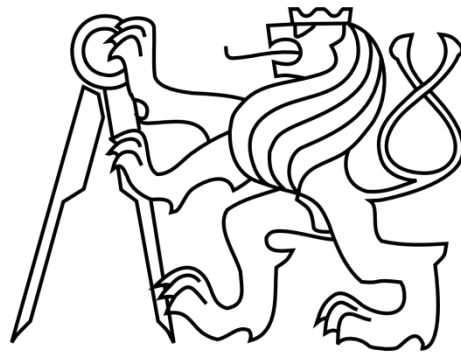


ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA
STROJNÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
2019

JAN
JÍROVEC

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jírovec** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **465329**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Fluidní způsob sušení biomateriálů

Název bakalářské práce anglicky:

Fluidized bed drying of biomaterials

Pokyny pro vypracování:

Zhodnoťte možnost fluidního sušení pro biomasu.

Práce bude obsahovat:

1. Zpracování rešerše typů sušek a popis procesu sušení.
2. Vzájemné srovnání typů sušení a výběr vhodných koncepcí pro sušení biomasy.
3. Rozdělení fluidních sušek a popis hlavních konfigurací pro různé typy sušených materiálů.
4. Základní bilanční výpočet pro předběžný návrh fluidní sušky.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

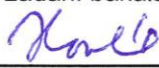
Ing. Jan Havlík, Ph.D., ústav energetiky FS

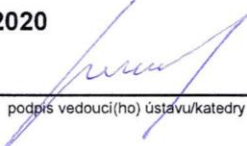
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:


Datum zadání bakalářské práce: **17.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **05.06.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2020**

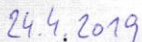

Ing. Jan Havlík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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


24.4.2019

Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a to výhradně s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis

Anotace

V této práci jsem se zabýval sušením bio materiálů. Zpracoval jsem rešerši typů sušek a vzájemně je porovnal. Z těchto typů sušek jsem vybral vhodné typy pro sušení biomasy. Dále jsem se zabýval fluidními suškami a provedl základní bilanční výpočet pro předběžný návrh fluidní sušky.

Klíčová slova

Biomasa, fluidní sušení, sušení biomateriálů

Abstract

This thesis is focused on drying of biomaterials. I researched available types of dryers and compared them. I chose types of dryers suitable for biomass drying. I then focused on fluid dryers and calculated the basic energy balance for a preliminary fluid dryer concept.

Keywords

Biomass, fluid drying method, drying of biomaterials

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat panu Ing. Janu Havlíkovi, svému vedoucímu práce, a panu Ing. Zdeňku Fundovi za jejich vstřícný přístup, cenné rady a pomoc při vzniku této práce. Dále bych chtěl poděkovat své přítelkyni, rodině a přátelům za jejich podporu při mém studiu.

Obsah

1. Seznam symbolů.....	7
2. Úvod.....	8
3. Typy sušáren.....	9
4. Dělení podle konstrukčního řešení	9
4.1. Bubnové sušárny	9
4.2. Komorové sušárny.....	10
4.3. Fluidní sušárny	10
4.4. Rozprašovací sušárna	10
5. Dělení podle přenosu tepla	11
5.1. Konduktivní sušení.....	11
5.2. Konvektivní sušení	11
5.3. Radiační sušení.....	11
6. Sušky pro biomasu	11
6.1. Průmyslové sušičky biomasy	12
6.2. Zvýšení účinnosti sušení biomasy	12
6.3. Průmyslové využití konvektivního sušení.....	12
6.4. Průmyslové využití konduktivního sušení.....	13
6.5. Srovnání sušek pro biomasu.....	14
6.6. Obecné srovnání na základě formy sušeného materiálu.....	15
6.7. Srovnání sušek na základě možnosti sušených materiálů.....	16
6.8. Obecné srovnání na základě rychlosti procesu sušení.....	17
7. Fluidní sušení.....	18
7.1. Skupiny materiálů.....	18
7.2. Typy fluidních sušek	19
8. Předběžný výpočet energetické bilance pro sušení dřevní štěpky	23
8.1. Dřevní štěpka.....	25
9. Základní bilanční výpočet pro předběžný návrh fluidní sušky.....	26
9.1. Výpočet tlakové ztráty.....	34
10. Závěr	37
Použitá literatura a zdroje	38
Seznam tabulek	40
Seznam grafů	41
Seznam obrázků	42

1. Seznam symbolů

symbol	význam	jednotka
ΔW	změna obsahu vody v materiálu	1
W^f	obsah vody na začátku	1
W^l	obsah vody na konci	1
c_p	měrná tepelná kapacita	kJ/kg K
l_v	výparné teplo	kJ/kgK
Q	dodané teplo	J
ε_{mf}	mezerovitost	1
Φ_s	sféricita	1
d_p	velikost částic	mm
u_{mf}	minimální fluidní rychlost	m/s
ρ_g	hustota plynu	kg/m ³
ρ_s	hustota materiálu	kg/m ³
μ	kinematická viskozita	m ² /s
g	gravitační zrychlení	m/s ²
$S_{průtoku}$	plocha průtoku	m ²
\dot{V}	objemový průtok	m ³ /s
Δp_{fr}	tlaková ztráta	Pa
L_m	výška sušky	m
g_c	konverzní faktor gravitačního zrychlení	kgm/Ns ²

2. Úvod

Proces sušení materiálů se používá v mnoha oborech (např. v potravinářství, energetice, zemědělství, farmaceutickém a chemickém průmyslu a v dalších). Primárním účelem je odvedení přebytečného množství vody, která jinak zhoršuje vlastnosti daného materiálu – ať už se jedná například o nižší trvanlivost potravin a zemědělských plodin nebo výhřevnost paliv v energetice nebo z důvodu dalšího zpracování materiálu – zlepšení jeho vlastností a příprava pro další fáze výroby.

V této práci se budu zabývat možností sušení biomateriálů fluidním způsobem. Fluidní způsob sušení patří mezi hojně rozvíjený způsob sušení, jehož hlavní výhodou je velmi intenzivní přenos tepla mezi částicemi sušeného materiálu a pracovním médiem, díky čemuž lze dosáhnout značných energetických úspor. Současně lze proces fluidního sušení optimalizovat pro celou řadu materiálů (vhodnou předúpravou) a můžeme jej použít v mnoha průmyslových oborech.

3. Typy sušáren

Sušárna je zařízení sloužící k odvodu přebytečné vlhkosti z materiálu odpařením nebo sublimací. Sušárny rozdělujeme především na základě konstrukčního řešení (design, provozní tlaky, provoz sušárny) a způsobu přívodu/přenosu tepla (typ sušicího média, proudění uvnitř sušky).

3.1. Konstrukční řešení

- Design – bubnové, pásové, tunelové a další
- Provozní tlaky – podtlakové, přetlakové, atmosférické
- Sušící médium – spaliny, pára
- Provoz sušárny – kontinuální, diskontinuální
- Proudění média – vzhov vysoušeného materiálu, proudění okolo statického materiálu

3.2. Způsob přívodu tepla

- Konvektivní – přenos tepla ohřátým (sušícím) médiem
- Konduktivní – přenos tepla přímým kontaktem materiálu s kontaktní plochou sušárny
- Radiační – přenos tepla zářením, vlněním [1], [2]

4. Dělení podle konstrukčního řešení

4.1. Bubnové sušárny

Bubnové, nebo také válcové, sušárny pracují na konduktivním přenosu tepla. Do válce, který se otáčí okolo své podélné osy, se vloží sušený materiál. Stěny válce jsou ohřívány a na jejich povrchu tak dochází k vysušení materiálu. Vodní páry se v průběhu sušení odvádí pryč z prostoru válce ventilem do okolí.

4.2. Komorové sušárny

Komorové sušárny se sestávají ze skříně, jejíž tvar a velikost se liší dle účelu použití. Stěny jsou zpravidla dvouplášťové kvůli zamezení úniku tepla do okolí. Do prostoru sušárny (skříně) se ventilátorem vhání ohřátý vzduch – komorové sušárny tedy řadíme, dle rozdělení podle přenosu tepla, mezi tzv. konvektivní. Kvůli rovnoměrnému sušení je potřeba materiál promíchávat v průběhu vysoušení. U komorových sušáren lze vysoušet jak za atmosférického tlaku, tak při podtlaku v prostoru sušárny, díky čemuž je provoz sušky šetrnější.

Speciálním příkladem komorové sušárny jsou i tzv. tunelové sušárny, kde se vysoušený materiál pomalu pohybuje na páscech proti směru proudícího vzduchu.

4.3. Fluidní sušárny

Fluidní sušárny fungují na principu vznosu částic. V prostoru sušárny (skříně) je na jemné síto vložen sypký materiál, který se vlivem proudění ohřátého média (zpravidla vzduch) vznáší v prostoru. Jednotlivé částice se tak od sebe oddělí a díky bezprostřednímu kontaktu s teplým médiem dochází k velmi intenzivnímu sušení. Jejich provoz lze poměrně snadno automatizovat, pořizovací náklady jsou ovšem výrazně vyšší než u jiných typů sušáren. Používají se především v potravinářském a farmaceutickém průmyslu, pro sušení biomasy.

4.4. Rozprašovací sušárna

U rozprašovacích sušáren dochází k ochlazení vhněného teplého vzduchu tryskami, které rozprašují jemné mlhy par do prostoru skříně. Díky tomu je sušení šetrné a nedochází tak k zásadním změnám vlastností sušeného materiálu. Rozprašovací sušárny se používají zejména ve farmaceutickém a potravinářském průmyslu [1],[2].

5. Dělení podle přenosu tepla

5.1. Konduktivní sušení

K přenosu tepla při konduktivním sušení dochází přímým kontaktem sušeného materiálu s kontaktní plochou. Na rozdíl od konvektivního sušení slouží sušící medium uvnitř prostoru sušárny pouze k odvodu vlhkosti od sušeného materiálu. K ohřevu kontaktní plochy se používá zpravidla pára.

5.2. Konvektivní sušení

Konvektivní způsob sušení materiálu spočívá v přenosu tepla ohřátým sušícím médiem. Obvykle jím bývá ohřátý vzduch nebo přehřátá pára, případně lze použít i inertní plyny nebo spaliny – teplota sušícího média však v každém případě musí být vyšší než teplota sušeného materiálu. S ohledem na sušený materiál k samotnému sušení dochází buď ofukem tryskami (např.: sušení mléka, ovocných šťáv), ve vrstvách (např.: sušení masa, zeleniny) nebo při plném vznosu (např.: sušení obilovin a drobných zrn)[3].

5.3. Radiální sušení

V radiálních sušárnách dochází k ohřevu povrchu materiálu infračerveným zářením. Použitá vlnová délka se odvíjí od použitého materiálu, zpravidla však využíváme rozmezí 1-2 μm (blízké pásmo)[2].

Pro sušení lze použít i slunečního záření a to jak přímým ohřevem sušeného materiálu, tak ohřevem sušícího média, které pak do styku se sušeným materiálem přichází. Vysoušený materiál, jedná se především o potraviny či koření, je uložen v komoře. Komořou, jejíž vnitřek je ohříván dopadajícím slunečním zářením, díky rozdílu venkovní a vnitřní teploty proudí vzduch jenž odvádí vlhkost z prostoru sušky. Tento proces může probíhat samovolně nebo v kombinaci s ventilátory, které proces sušení za cenu vyšších nákladů a spotřeby energie urychlují. Při započtení i ostatních nákladů na sušení (pracovní síla, energie, doba sušení) však kombinovaný způsob sušení vychází výhodněji[4],[5].

6. Sušky pro biomasu

Biomasu je před spalováním potřeba zbavit přebytečné vlhkosti – běžné hodnoty vlhkosti před sušením jsou v rozmezí 50-100%, po sušení optimálně okolo hodnoty 10%. Pokud bychom tak neučinili, uvolněné vodní páry by ochlazovaly prostor v kotli a spalování, stejně tak i celkový energetický výnos, by tedy nebylo tak účinné. Přebytečná pára by se zároveň

musela odvést z kotle spolu se spalinami, což by kladlo nárok na větší rozměry zařízení a tím pádem by rostla i pořizovací cena. Nejen z těchto důvodů je proto potřeba biomasu před spalováním vysušit a zlepšit tím její vlastnosti vzněcování, dosáhnout snazšího hoření dosahujícího vyšších teplot, snížení komínových ztrát a dosáhnout vyšší účinnosti a energetické výnosnosti.

6.1. Průmyslové sušičky biomasy

Pro průmyslové použití existuje několik druhů užívaných sušek, které rozdělujeme zejména na základě sušeného materiálu – na základě jeho homogenity, jeho velikosti, dosahovaných teplot, způsobu přívodu tepla a na ekonomických nákladech (ať už pro pořízení nové sušky tak pro následný provoz). Za účelem zvýšení účinnosti vysoušení se sušky navrhují tak, aby docházelo k co nejmenším ztrátám a k co nejefektivnějšímu využití odpadního tepla i z jiných částí zařízení, je-li to možné. K celkovému zvýšení účinnosti lze použít i odpadní teplo ze sušky v jiných částech provozu.

6.2. Zvýšení účinnosti sušení biomasy

Ke zvýšení účinnosti při sušení biomasy lze před samotným tepelným vysoušením použít i další, především mechanické způsoby odvlhčování. Tyto způsoby dále dělíme na aktivní a pasivní.

Mezi aktivní způsoby patří například lisování nebo odstředění, přičemž zvolený způsob bude záviset na sušeném materiálu, požadavkům na dosažený stav vlhkosti a pořizovacích nákladech. Obecně lze však říci, že při použití mechanického odvlhčení lze velmi rychle dosáhnout vlhkosti materiálu okolo 50%.

K pasivním způsobům patří například filtrace, kdy se vlhký materiál vloží do filtračních pytlů, které umožňují odvod vypařené vodě z materiálu, ale nepropustí dovnitř vlhkost z okolního prostředí. Touto metodou lze dosáhnout vlhkosti okolo 30% a jedná se o velmi levný způsob odvlhčení. Časově je však filtrace velmi náročná – jedná se o řády měsíců [6].

6.3. Průmyslové využití konvektivního sušení

V průmyslovém měřítku se s výhodami pro ohřev využívá přehřáté páry, která je přivedena do prostoru sušky. Teplota páry při průchodu musí zůstat nad čarou nasycení – nesmí docházet k její kondenzaci. Na výstupu ze sušky tím pádem odchází větší množství páry o nižší teplotě (pára přivedená s odpařenou vlhkostí ze sušeného materiálu), kterou lze po ohřevu mimo prostor sušky znovu dovést do sušícího prostoru a uzavřít tak cyklus. Nadbytečnou páru lze

případně využít v jiné části provozu a snížit tak ztráty nevyužitého odpadního tepla z procesu sušení – v tomto případě budeme přivádět páru za vyššího tlaku (vyšší než atmosférický). Pokud nadbytečnou páru není možné využít v jiné části provozu, lze páru přehřát a přivést do další sušky nebo lze páru přivádět za nižšího tlaku, kdy je teplota varu vody nižší a je tedy potřeba dodávat méně tepla. V závislosti na možnostech využití odváděné páry jsou tyto sušky efektivnější než sušky s konduktivním ohřevem [6].

Konvektivní sušky se dají použít především pro sypké materiály - ať už se jedná o rozemletý materiál (piliny, listy - odpady z lesnictví, zbytky zemědělských rostlin, seno a travní směsi) nebo přímý produkt zemědělské produkce (zrní, rýže). Fungují na fluidním principu - vysoušený materiál se vkládá do komory na rošt, kterým lze prohánět ohřátý vzduch, přehřátou sytou vodní páru nebo případně i spaliny - jedná-li se o energetické využití suchého produktu.

Sušky s parním ohřevem lze s výhodami zapojovat do provozu tepelných elektráren, kde mohou využívat odpadního tepla elektrárny k vlastnímu ohřevu biomasy. Lze je však použít pouze pro sušení částic podobné velikosti, což může vést k potřebě dalších předúprav materiálu (mletí apod.) a tedy i ke zvýšení energetické náročnosti celkového sušení a ke zvýšení pořizovacích a provozních nákladů.

6.4. Průmyslové využití konduktivního sušení

Konduktivní způsob sušení se s výhodami využívá například v zemědělství - lze takto sušit jak suché plody nebo krmivo pro chovná zvířata, tak lze tímto způsobem sušit i například dřevní materiál (dřevní biomasa). Konstrukčně se zpravidla vždy jedná o rotující válec, ve kterém je sušený materiál kontinuálně promícháván, aby se jednak urychlil proces sušení a aby se také dosáhlo rovnoměrné vlhkosti u vysušeného produktu. Teplo se přenáší přes plášť válce, který je nejčastěji ohříván vodní párou nebo elektrickým ohřevem.

Konduktivní sušky jsou, co se energetického provozu týče, účinnější než sušky konvektivní - u konvektivních sušek totiž velké množství tepla odchází spolu se ohřívajícím plynem. U vsázky navíc není potřeba zajistit podobnou velikost sušených částic a jejich velikost může být větší než je tomu při konvektivním sušení - můžeme se obejít bez dalších operací během předúpravy.

Abychom dosáhli rovnoměrné vlhkosti materiálu, je potřeba vsázku během sušení promíchávat.

Možné konstrukční řešení sušky při konduktivním způsobu ohřívání by například pro dřevní štěpku mohla být podtlaková bubnová suška ohřívána vodní parou nebo s elektrickým ohřevem.

Konduktivní sušky se s výhodou využívají u již stávajících teplárenských podniků. Pára odvedená z prostoru sušky lze zavést, po přivedení do potřebného stavu, do oběhu pro výrobu elektrické energie. Zavedení sušek do těchto provozů přináší nemalé ekonomické úspory[3].

6.5. Srovnání sušek pro biomasu

Základní dělení sušek lze provést na základě tří bodů -

- způsob přenosu tepla
- teplota a tlak během sušení
- průběh zpracování materiálu během sušení (uvnitř sušky)[9]

Další kritéria výběru sušky se odvíjí jednak od typu sušeného materiálu (na základě jeho homogenity, vstupní vlhkosti, velikosti jednotlivých částic, doba sušení, požadovaná vlhkost materiálu po sušení) tak na základě provozních požadavků (velikost, spotřeba energie, způsob přenosu tepla, účinnosti odpařování vody, pořizovací a provozní náklady). Z hlediska kvality vysušeného produktu je nutné dbát na optimální průběh sušení. V případě přesušení totiž mnohdy hrozí degradace sušeného materiálu, jeho fázové změny nebo vznícení prachových částic.

6.6. Obecné srovnání na základě formy sušeného materiálu

Tabulka 1; Srovnání na základě formy sušeného materiálu[9]

	Pásová suška	Rotační	Rotační (parní)	Fluidní
Piliny	x	x	x	
Granulát		x		x
Dřevní hobliny	x			
Dřevní štěpka	x	x		x
Kůra		x		
Dřevní odřezky od zpracování			x	

6.7. Srovnání sušek na základě možnosti sušených materiálů

Feed type	Dryer type	New techniques*
Liquid Suspension	<ul style="list-style-type: none"> • Drum • Spray 	<ul style="list-style-type: none"> • Fluid/spouted beds of inert particles • Spray/fluid bed combination • Vacuum belt dryer • Pulse combustion dryers
Paste/sludge	<ul style="list-style-type: none"> • Spray • Drum • Paddle 	<ul style="list-style-type: none"> • Spouted bed of inerts • Fluid bed (with solid backmixing) • Superheated steam dryers
Particles	<ul style="list-style-type: none"> • Rotary • Flash • Fluidized bed (hot air or combustion gas) 	<ul style="list-style-type: none"> • Superheated steam FBD • Vibrated bed • Ring dryer • Pulsated fluid bed • Jet-zone dryer • Yamato rotary dryer
Continuous sheets (coated paper, paper, textiles)	<ul style="list-style-type: none"> • Multi-cylinder contact dryers • Impingement (air) 	<ul style="list-style-type: none"> • Combined impingement/radiation dryers • Combined impingement and through dryers (textiles, low basis weight paper) • Impingement and MW or RF

*New dryers do not necessarily offer better techno-economic performance for all products

Obrázek 1; Srovnání sušek - konvenční a nové typy na základě formy sušeného materiálu, [14]

Nature of Feed	Liquids			Cakes		Free-Flowing Solids					Formed Solids
	Solution	Slurry	Pastes	Centrifuge	Filter	Powder	Granule	Fragile Crystal	Pellet	Fiber	
<i>Convection Dryers</i>											
Belt conveyer dryer							×	×	×	×	×
Flash dryer				×	×	×	×			×	
Fluid bed dryer	×	×		×	×	×	×		×		
Rotary dryer				×	×	×	×		×	×	
Spray dryer	×	×	×								
Tray dryer (batch)				×	×	×	×	×	×	×	×
Tray dryer (continuous)				×	×	×	×	×	×	×	
<i>Conduction Dryers</i>											
Drum dryer	×	×	×								
Steam jacket rotary dryer				×	×	×	×		×	×	
Steam tube rotary dryer				×	×	×	×		×	×	
Tray dryer (batch)				×	×	×	×	×	×	×	×
Tray dryer (continuous)				×	×	×	×	×	×	×	

Obrázek 2; Rozdělení sušek na základě formy sušeného materiálu, [9 ,str. 73]

6.8. Obecné srovnání na základě rychlosti procesu sušení

Tabulka 2; Srovnání sušek na základě rychlosti sušení, [9]

Typ sušky		Obvyklá doba sušení		
		10-30 (s)	10-60 (min)	1-6 (h)
Konvekční sušky	Rotační		x	
	Pásová (komorová)		x	
	Pásová (dávková)			x
	Fluidní		x	
	Rozprašovací	x		
Konduktivní sušky	Bubnová	x		
	Rotační (parní)		x	
	Komorová (dávková)			x
	Komorová (kontinuální)		x	

Pro sušení biomasy jsou nejčastěji používanými rotační sušky jak konvektivního tak konduktivního typu. Konvektivní sušky se používají pro sypké materiály a zpravidla samotnému sušení předchází předúprava vsázky - drcení nebo mletí.

V práci se dále zabýváme fluidním sušením, jehož výhodou je velmi intenzivní přestup tepla mezi pracovním plynem a částicemi materiálu, což vede k energetickým úsporám a ke kratší době sušení.

7. Fluidní sušení

Fluidní sušení je založené na principu profukování sypkých částic proudícím ohřátým médiem. Díky tomu dochází ke styku po celé ploše sušeného materiálu (sušených částic) a celý proces vysušování je díky tomu velmi intenzivní. Urychlení procesu lze dosáhnout např. mechanickým promícháváním (mechanickým kmitáním porézního dna sušárny) sušeného materiálu během vysušování[8].

Mezi hlavní přednosti fluidního sušení patří vysoká míra přestupu tepla mezi částicemi sušeného materiálu a prostředím a plynulost provozu. Na základě konstrukčního řešení lze dospět k úsporám jak na potřebný prostor (vertikální sušky) tak k úsporám provozním (sušky bez mechanických částí, u kterých klesají náklady na servis)[7].

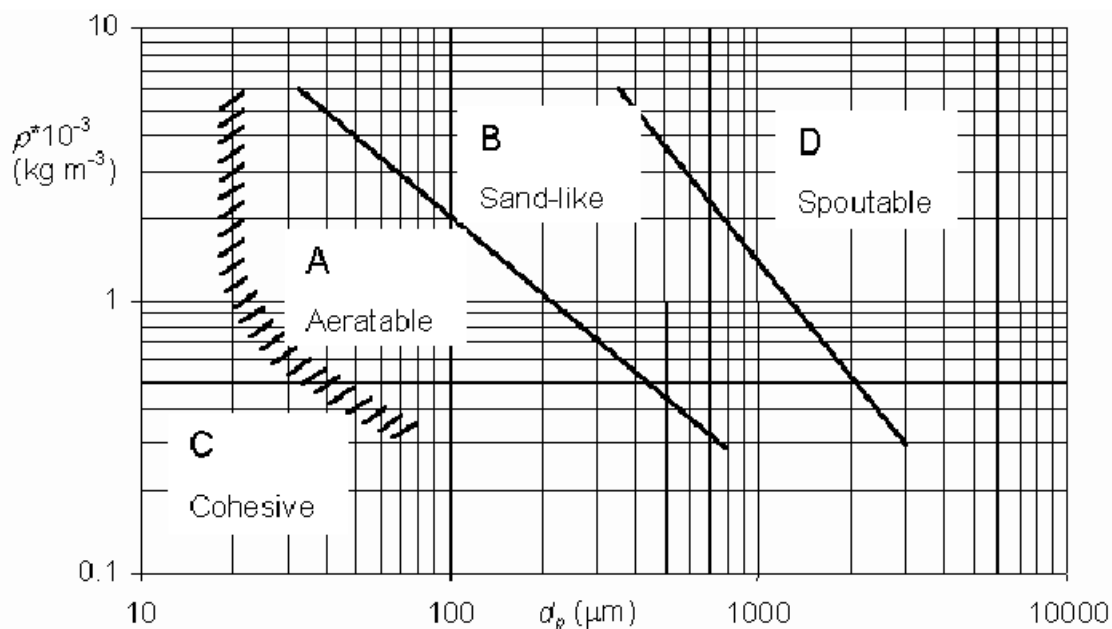
Nevýhodou fluidního sušení je především podmínka tvaru a velikosti částic sušeného materiálu - podobná velikost a tvar je stěžejní pro optimální průběh sušení. Tento fakt komplikuje proces sušení o další mnohdy technologicky náročné přípravné operace a prodražuje tak samotný provoz sušky. Je nutné také dbát na drsnost povrchu částic z hlediska zvýšeného tření mezi částicemi a z hlediska životnosti sušky –opotřebením vnitřního povrchu komory. S tím souvisí i případná vzájemná adheze částic, která brání fluidizaci a k správné výměně tepla mezi prostředím a částicemi materiálu[7].

Fluidní sušky nacházejí použití v mnoha průmyslových odvětvích - potravinářství, výroba krmiv, farmaceutický průmysl, chemický průmysl, sušení biomasy, sušení uhlí, sušení sypkých materiálů (písek apod.)[8].

7.1. Skupiny materiálů

Sušené materiály lze rozdělit na základě fluidizace do čtyř základních skupin podle tzv. Geldartovy klasifikace (Obrázek 3) [12] -

- skupina A - vzdušné částice, částice snadno dosahující fluidizace za sucha
- skupina B - částice snadno dosahující fluidizace za sucha, "pískové" částice
- skupina C - jemné a velmi jemné částice, částice obtížně dosahující fluidizace (např. vlivem kohézních sil mezi jednotlivými částicemi)
- skupina D - velké a husté částice, fluidizace je velmi obtížná (vznikají velké vzduchové bubliny)



Obrázek 3; Geldartova klasifikace částic[12]

Tabulka 3; Srovnání fluidní a vibrační fluidní sušky, [13]

	Fluidní suška	Fluidní suška (vibrační)
Doba sušení [s]	600	300-480
Spotřeba plynu [Nm³/kg]	13	8
Spotřeba energie [kJ/kg]	3240	1380
Kvalita vysušeného materiálu	Snížena	Snížena

7.2. Typy fluidních sušek

V současné době již existuje a průmyslově se používá mnoho druhů fluidních sušek, další prozatím fungují nebo se testují v experimentální rovině a laboratorních podmínkách. Je tedy důležité na základě ekonomických, environmentálních nebo i bezpečnostních požadavcích pro konkrétní případ vybrat optimální typ fluidní sušky (potažmo sušky obecně) a výběr samotný proto nelze jednoduše generalizovat. Do této problematiky navíc vstupuje i možnost

kombinování a zařazení několika fází sušení odlišnými metodami, v jejichž důsledku lze dosáhnout vyšší ekonomičnosti provozu a dalších výhod. Sušku tedy zpravidla navrhujeme pro konkrétní případ a konkrétní použití individuálně.

Ze základního rozdělení (podle [9, str. 235]) jsem vyzdvihl hlavně tato kritéria výběru:

- 1) druh provozu
 - a) dávkový
 - b) semikontinuální
 - c) kontinuální
- 2) provozní tlak
 - a) nízký (produkty náchylné k teplotnímu ovlivnění)
 - b) atmosférický (nebo jemu blízký)
 - c) vysoký (~5 barů; použití přehřáté páry)
- 3) forma sušeného materiálu
 - a) tuhé částice (všechny skupiny částic podle Geldartovy klasifikace)
 - b) kaly, pasty (aplikovány na aditivní materiály - silikon, inertní částice)
- 4) přestup tepla
 - a) konvektivní
 - b) konduktivní
 - c) trvalý
 - d) přerušovaný
- 5) vznik fluidizace
 - a) pneumaticky
 - b) proudem plynu
 - c) spolu s mechanickým buzením
 - d) externí síly/silová pole (mícháním, rotací, magnetické pole, akustické pole, radiové vlny)
- 6) fluidizační plyn (médiu)
 - a) ohřátý vzduch, kouř, spaliny
 - b) přehřátá pára
 - c) odvlhčený studený vzduch

7.2.1. *Dávkové fluidní sušky*

Fluidní sušky fungující na bázi dávkového provozu se používají zpravidla pro malé množství sušeného materiálu (dle [9, str. 236]) a jedná se o dávky do 1000 kg/h, případně mění-li se často v rámci provozu linky sušený materiál. V případě sušení materiálů, u kterých lze obtížně dosáhnout fluidizace lze přidat do procesu sušení mechanické procesy - mechanické a vibrační promíchávání materiálu.

7.2.2. *Semikontinuální fluidní sušky*

Semikontinuální provoz lze použít pro optimalizaci sušení pro různé stupně vlhkosti materiálu - materiál se v dávkách postupně posouvá provozem. Na každé úrovni (v každém stupni procesu sušení) lze použít různé teploty a rychlosti proudění během sušení.

7.2.3. *Kontinuální fluidní sušky*

Kontinuální sušky patří mezi nepoužívanější typ fluidních sušek. Jejich hlavní výhodou je zrovnoměrnění úrovně vlhkosti částic sušeného materiálu jejich kontinuálním promícháváním během fluidizace a dosažením rovnoměrné teploty uvnitř sušky. Na druhou stranu se tím prodlužuje doba sušení - čas potřebný k dosažení rovnoměrné vlhkosti částic. Z konstrukčního hlediska se zpravidla jedná o vertikální sušky.

7.2.4. *Přepážkové fluidní sušky*

Přepážky se do prostoru komory sušky vkládají z důvodu usměrnění proudu pracovního média a sušených částic. Přepážka (např. perforované dno fluidního lože) je rozložena po celé délce horizontální komory sušky a částice o stejné vlhkosti prochází postupně komorou sušky. Další výhodou je sjednocení doby sušení v jednotlivých částech sušárny a rovnoměrná vlhkost částic materiálu na výstupu ze sušky.

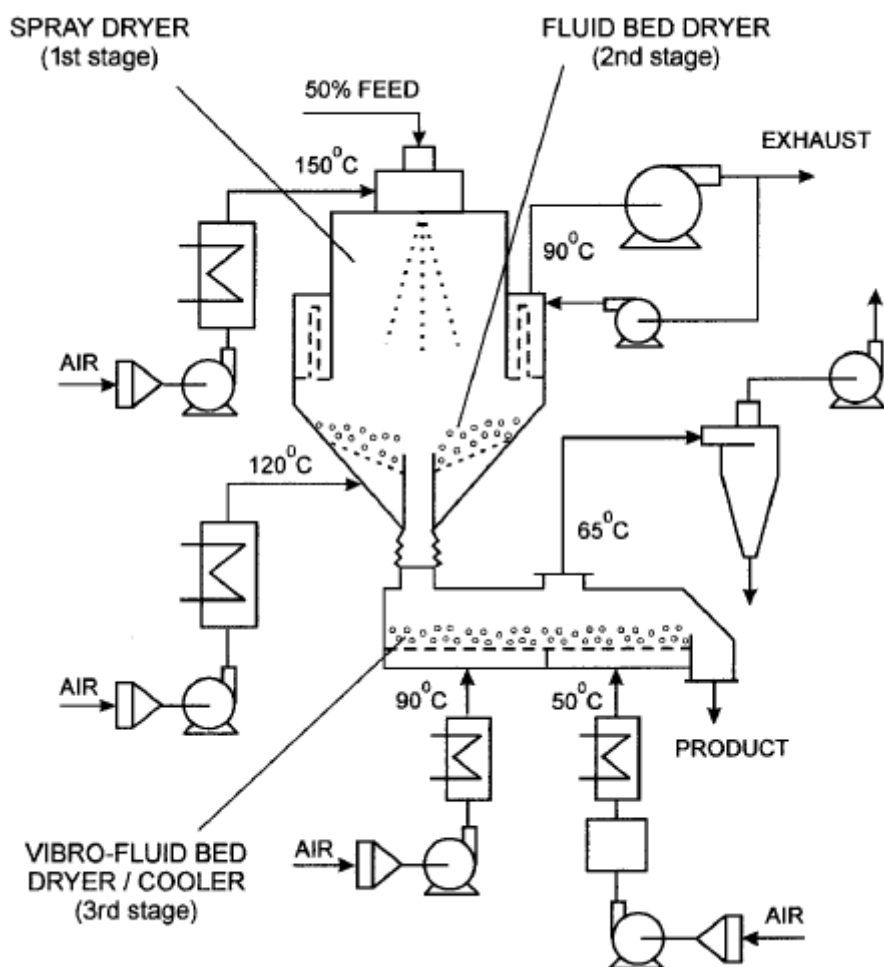
7.2.5. *Upravované fluidní sušárny*

Modifikací, případně i kombinací, výše zmíněných typů fluidních sušek lze dosáhnout optimalizace pro konkrétní potřeby sušení - na základě sušeného materiálu, velikosti jeho částic, požadované výstupní vlhkosti apod. Díky tomu lze překonat některé nevýhody konvenčních typů sušek.

Optimalizace probíhá zejména přidáním meziprocesů do provozu - mechanické promíchávání materiálu, vibrační fluidní lože, perforované lože v sušce, řazení fluidních, případně i jiných typů (např. "flash") sušek v provozu ideálně podle vlhkosti materiálu pro kontinuální provoz.

"Flash" sušky se používají pro rychlé odstranění povrchové vlhkosti na částicích materiálu, čímž výrazně snižují potřebnou dobu sušení při následném fluidním sušení. Pořizovací cena takového zařízení je samozřejmě vyšší, ovšem výsledné provozní náklady jsou díky menší energetické náročnosti procesu nižší a díky nižším dosahovaným teplotám lze dosáhnout i vyšší kvality vysušeného materiálu [13].

Na schématu (Obrázek 4, [13, str. 360]) je příklad tzv. multistage sušky a v příložené tabulce (Tabulka 5, [13, str. 361]) jsou patrné úspory energie při použití několikastupňové sušky.



Obrázek 4; Schéma vícestupňové sušky, [13, str. 360]

Tabulka 4; Úspory energie u vícestupňových sušek [13, str. 361]

Stupeň	Spotřeba energie [W]	Úspora energie [%]
První	1447,5	0
Druhý	1233,2	15,4
Třetí	1103,5	24,3

Zapojení několika sušek v lince (tzv. "multistaging") s sebou do provozu však přináší i několik komplikací. Předně je třeba vyřešit přenos materiálu z jednoho stupně sušení do další fáze. Přenosu částic lze dosáhnout jak samotným prouděním (přepážka s přepadem do další fáze sušky) nebo pneumatickým přenosem[7].

8. Předběžný výpočet energetické bilance pro sušení dřevní štěpky

Cílem praktické části je výpočet energetické bilance sušky a určení podmínek pro fluidní sušení. Z energetického hlediska je nejvýznamnějším zvoleným materiálem dřevní štěpka, ostatní materiály (dřevní piliny, slámu a kukuřici) jsou voleny pro porovnání rozdílných vlastností (velikost částic, mezerovitost, sféricita částic) a jejich vlivu na fluidaci. Protože fluidace lze pro některé materiály za určitých podmínek dosáhnout jen velice obtížně, je potřeba do procesu sušení zařadit další přídavné operace. Mezi ty patří zejména předúprava sušeného materiálu a to především s ohledem na homogenitu a velikost částic dle Geldartovy klasifikace. Dalším možným řešením je dopomoci vyvolání a udržení fluidace např. mechanickým buzením.

Ve své práci jsem provedl energetickou bilanci sušky při předpokládaných parametrech

- sušeným materiálem je dřevo
- vlhkost materiálu na vstupu je 50%
- vlhkost materiálu na výstupu je 20%
- výpočet je proveden pro 1 kg materiálu

Z daných předpokladů vychází následující výpočet množství odpařené vody

$$\Delta W = \frac{W^r - W^1}{1 - W^1} = \frac{0,5 - 0,2}{1 - 0,2} = 0,375 \text{ kg}$$

V následující tabulce (Tabulka 6) jsou uvedeny hmotnosti materiálu v průběhu ohřevu

Tabulka 5; Přehled hmotnosti materiálu v průběhu sušení

celková hmotnost	1 kg
hmotnost vody na vstupu	0,5 kg
hmotnost suchého materiálu na vstupu	0,5 kg
hmotnost vody na výstupu	0,125 kg
množství odpařené vody	0,375 kg
hmotnost suchého materiálu na výstupu	0,5 kg
celková hmotnost na výstupu	0,625 kg
změna teploty	80

Za předpokladu měrné tepelné kapacity dřeva

$$c_p = 1,45 \text{ kJ/kgK [15]}$$

a výparného tepla vodní páry při tlaku 0,1 MPa

$$l_v = 2256,47 \text{ kJ/kgK}$$

Energie potřebné k ohřevu na **80°C** jsou uvedeny v tabulce níže

Tabulka 6; Potřebné energie k ohřevu

energie pro ohřátí dřeva	58 kJ
energie pro ohřátí vody	168 kJ
energie pro odpaření vody	846 kJ

celková energie potřebná k ohřevu vsázky je

$$Q = 1,07 \text{ MJ}$$

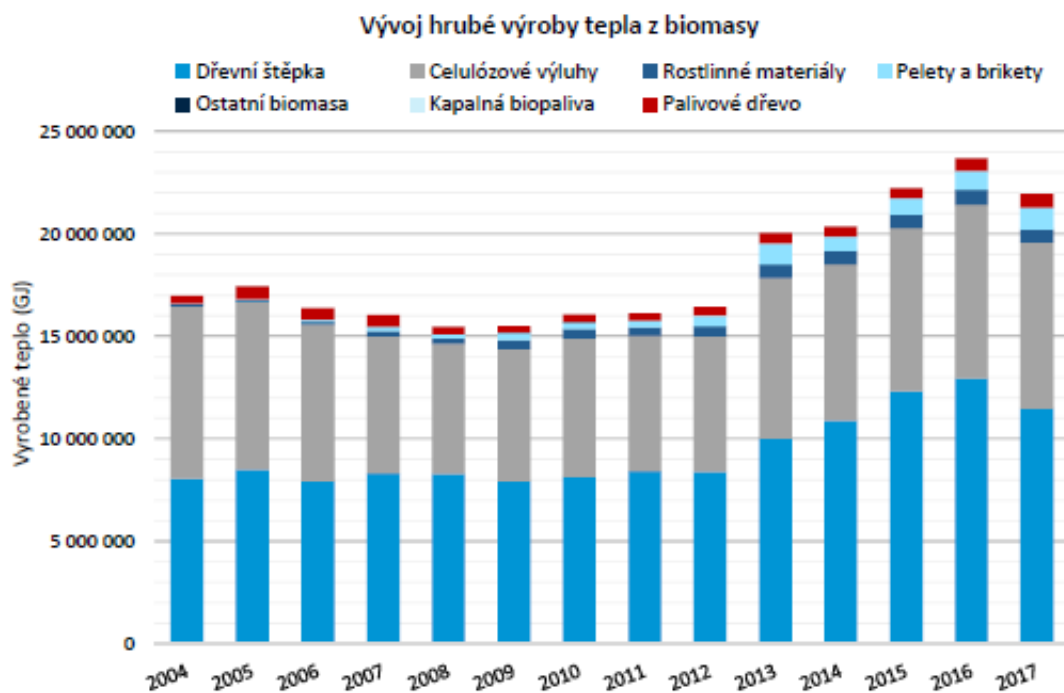
Při ohřevu suchým vzduchem o předpokládané hustotě **0,736 kg/m³** je potřeba přivést **12,95 kg** vzduchu, resp. **9,51 m³** vzduchu. Při ohřevu spaliny o předpokládané hustotě **0,74 kg/m³** je potřeba přivést **9,74 kg** spalin, resp. **7,21 m³** spalin.

8.1. Dřevní štěpka

Jedná se o odpad z procesu zpracování dřeva (lesní těžba, průmyslové zpracování) nebo cíleným drcením dřevních částí. Délka jednotlivých částí se pohybuje v rozmezí 3 až 250 mm v případě strojně drcené štěpky, jedná-li se však o odpad z průmyslové výroby mohou být jednotlivé částice dlouhé až 15 cm. Z tohoto důvodu je potřeba do procesu sušení připojit přídatné operace zajišťující stálost velikosti částic - např. aditivním drcením surového materiálu.

V této práci se zaměřím především na sušení dřevních materiálů (dřevní štěpka a dřevní odpady z lesní těžby) neboť se v České republice jedná o majoritní materiál při výrobě tepla a elektrické energie z biomasy (viz Graf 1).

Graf 1; Výroba tepla v České republice v roce 2017, [11]



9. Základní bilanční výpočet pro předběžný návrh fluidní sušky

Při návrhu podmínek fluidního sušení jsem vycházel z následujících předpokladů -

- pro porovnání jsem volil dvěsušící média - spaliny a suchý vzduch
- sušené materiály
 - dřevní štepka
 - dřevní piliny
 - sláma (drcená, řezaná)
 - kukuřice (vyloupaná)
- poměr výšky a průměru sušky je zvolen 1:1

Pro určení fluidní rychlosti je třeba znát jisté vlastnosti sušeného materiálu - zejména pak velikost částic, jejich sféricitu, mezerovitost, objemovou hmotnost a hustotu.

Tabulka 7; Přehled vlastností vysoušených materiálů

materiál	sféricita	mezerovitost	velikost částic [mm]	objemová hmotnost [kg/m ³]	hustota [kg/m ³]
dřevní štepka	0,5	0,704	20	200	675
dřevní piliny	0,75	0,520	1,5	120	250
sláma	0,75	0,556	3	40	90
kukuřice	0,6	0,167	15	600	720

Hodnota sféricity byla zvolena odhadem s ohledem na daný materiál. Zohlednění možné chyby, která by tím byla způsobena, je v závěru výpočtu při optimalizaci podmínek fluidace. Hodnoty objemových hmotností a hustoty byly převzaty z internetu [16].

Záměrně jsem volil materiály rozdílných vlastností a velikostí, abych mohl porovnat možnosti fluidace pro různé druhy materiálů dle Geldartovy klasifikace. V následující tabulce (Tabulka 8) je patrné jejich rozřazení.

Tabulka 8; Rozřazení částic na základě Geldartovy klasifikace

materiál	typ částice dle Geldartovy klasifikace
dřevní štěpka	D
dřevní piliny	A/B
sláma	A
kukuřice	D

Vliv na fluidní podmínky má i pracovní médium - plyn, kterým daný materiál vysoušíme. Uvažujeme dva pracovní plyny, viz tabulka (Tabulka 9).

Tabulka 9; Přehled vlastností pracovního média sušky

pracovní médium	hustota [kg/m ³]	kinematická viskozita [Pa*s]
suchý vzduch	0,736	24*10 ⁻⁶
spaliny	0,74	14*10 ⁻⁶

Na základě vztahu (18) z [17] byl proveden výpočet minimální potřebné fluidní rychlosti.

$$\frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 * \phi_s} \left(\frac{d_p * u_{mf} * \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150 * (1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 * \phi_s^2} \left(\frac{d_p * u_{mf} * \rho_g}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 * \rho_g (\rho_s - \rho_g) * g}{\mu^2}$$

Při sušení vzduchem vycházejí následující rychlosti (Tabulka 10) podle vztahu (18) z [17]

Tabulka 10; Minimální fluidní rychlost při vysoušení suchým vzduchem

materiál	rychlost [m/s]
dřevní štěpka	4,19
dřevní piliny	0,21
sláma	0,31
kukuřice	0,37

Při sušení spaliny vycházejí následující rychlosti (Tabulka 11) podle vztahu (18) z [17]

Tabulka 11; Minimální fluidní rychlosti při vysoušení spaliny

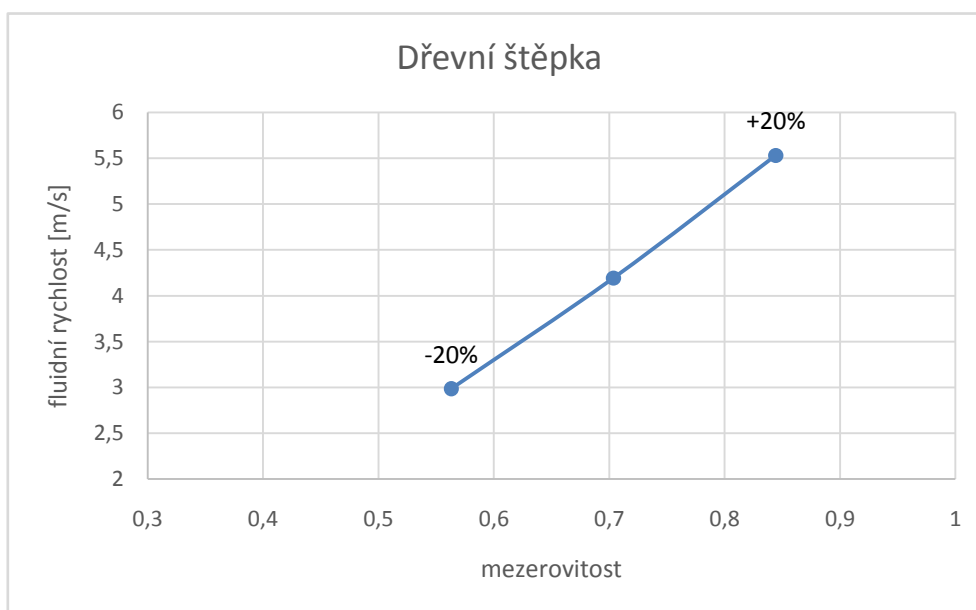
materiál	rychlost [m/s]
dřevní štěpka	4,19
dřevní piliny	0,30
sláma	0,38
kukuřice	0,41

Z výsledků je patrné, že vliv pracovního média na minimální fluidní rychlost, které je potřeba dosáhnout, je u daných materiálů zanedbatelný. Pro další výpočty již jako pracovní médium uvažujeme pouze spaliny.

Jelikož hodnoty sféricity byly pro jednotlivé materiály voleny odhadem a hodnoty mezerovitosti závisí na vlhkosti (resp. objemové hmotnosti materiálu) mohla ve výpočtu vzniknout chyba. Z tohoto důvodu je na následujících grafech patrna závislost velikosti fluidní rychlosti na mezerovitosti a sféricitě v okolí námi stanovené modelové hodnoty (+/- 20%).

Z grafu (Graf 2) je patrné, že vliv mezerovitosti nelze zanedbat. Pro stanovení optimálních hodnot fluidace by tedy bylo potřeba vycházet z přesnějších dat.

Graf 2; Závislost mezerovitosti na fluidní rychlosti pro dřevní štěpku



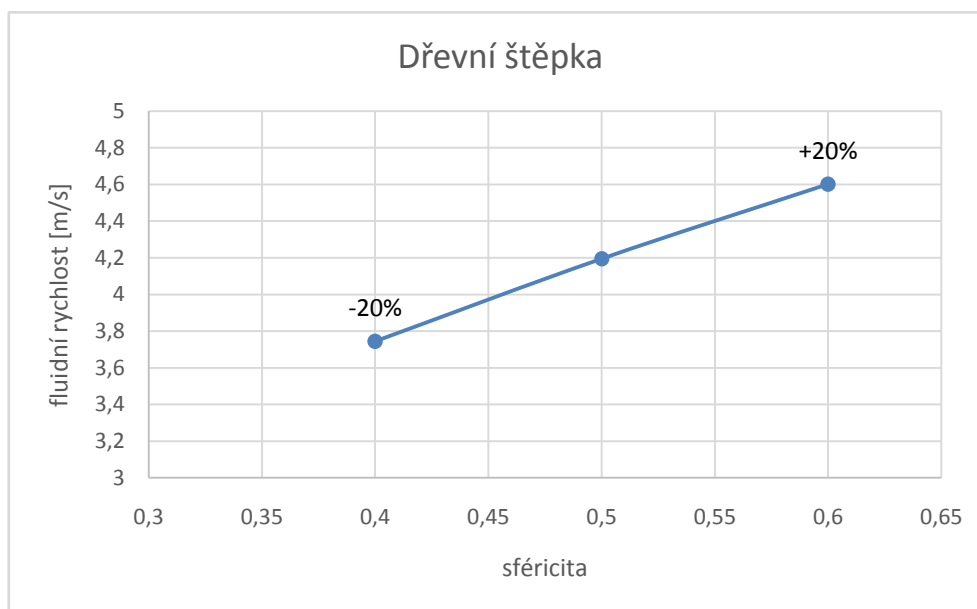
Hodnoty mezerovitosti a výsledných fluidních rychlostí jsou uvedeny v následující tabulce (Tabulka 12).

Tabulka 12; Vliv mezerovitosti na fluidní rychlosti pro dřevní štěpku

	mezerovitost	fluidní rychlost [m/s]
-20%	0,56	2,99
zvolená hodnota	0,70	4,19
+20%	0,84	5,53

Z grafu (Graf 3) je patrné, že vliv sféricity na fluidní rychlost není tak významný jako vliv mezerovitosti materiálu. Musíme však vzít v potaz, že v naší modelové situaci předpokládáme rovnoměrnou sféricitu všech částic materiálu. V praxi lze této rovnoměrnosti dosáhnout zpravidla pouze vhodnou předúpravou sušeného materiálu před samotným sušením.

Graf 3; Závislost sféricity na fluidní rychlosti pro dřevní štěpku



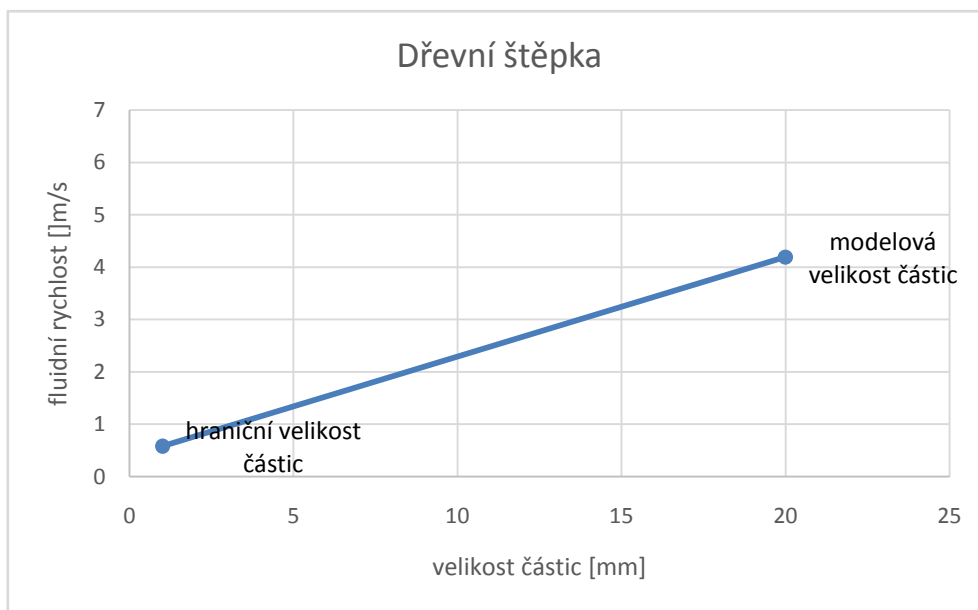
V tabulce (Tabulka 13) jsou výsledné fluidní rychlosti v závislosti na sféricitě částic.

Tabulka 13; Vliv sféricity na fluidní rychlosti pro dřevní štěpku

	sféricita	fluidní rychlost [m/s]
-20%	0,40	3,74
zvolená hodnota	0,50	4,19
+20%	0,60	4,60

Z následujícího grafu (Graf 4) je patrný vliv velikosti částic sušeného materiálu na fluidní rychlosti. Pro hraniční velikost částic dle Geldartovy klasifikace vychází rychlost několikanásobně menší. Z hlediska optimalizace fluidního sušení tedy vychází velikost částic jako zásadní faktor.

Graf 4; Závislost velikosti částic dřevní štěpky na fluidní rychlosti



Hraniční velikost částic (typ A dle Geldartovy klasifikace) ovšem odpovídá spíše prášku (velmi jemnému sypkému materiálu dřevního původu). Je poté otázkou, dá-li se takový materiál ještě označit za dřevní štěpku.

Výsledné fluidní rychlosti pro uvažovanou a hraniční velikost částic jsou v tabulce níže (Tabulka 14).

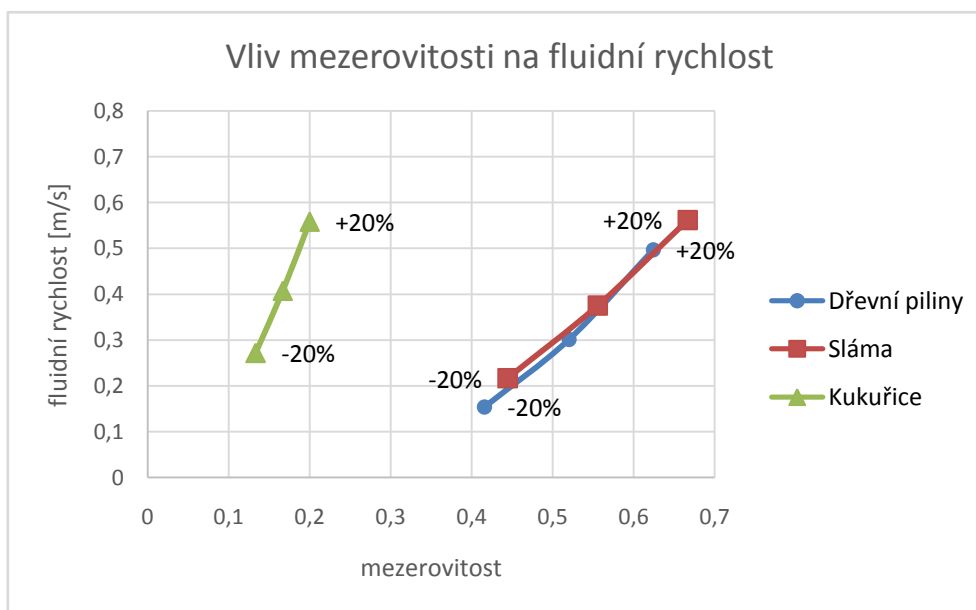
Tabulka 14; Vliv velikosti částic na fluidní rychlosti pro dřevní štěpku

	velikost [mm]	fluidní rychlost [m/s]
modelová hodnota	20	4,19
hraniční velikost dle Geldartovy klasifikace	1	0,58

Pro porovnání jsem k dřevní štěpce zvolil ještě další biomateriály – kukuřici (která se svou velikostí částic podobá dřevní štěpce) a poté dřevní piliny a slámu, jejichž částice jsou oproti dřevní štěpce výrazně menší.

Pro přehlednost vlivu jejich mezerovitosti a sféricity na minimální fluidní rychlosti jsem tyto tři materiály vložil vždy do jednoho grafu (Graf 5 a Graf 6).

Graf 5: Vliv mezerovitosti na fluidní rychlosti pro dřevní piliny, slámu a kukuřici



Výsledné fluidní rychlosti pro kukuřici jsou v tabulce níže (Tabulka 15).

Tabulka 15: Vliv mezerovitosti na fluidní rychlosti pro kukuřici

	mezerovitost	fluidní rychlost [m/s]
-20%	0,13	0,27
zvolená hodnota	0,17	0,41
+20%	0,20	0,56

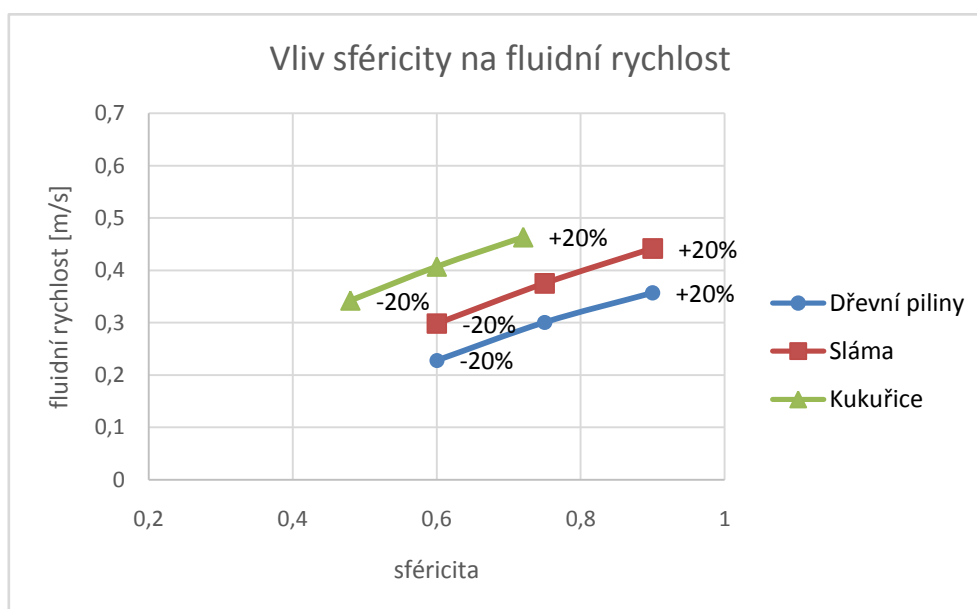
Při sušení dřevních pilin je vliv mezerovitosti na výslednou fluidní rychlost, stejně jako u dřevní štěpky, nezanedbatelný, ačkoliv se jedná o materiál více sypký (menší částice). Rozdíly v rychlostech při změnách mezerovitosti pro dřevní piliny dosahují až 50% (Tabulka 16).

Tabulka 16; Vliv mezerovitosti na fluidní rychlosti pro dřevní piliny

	mezerovitost	fluidní rychlost [m/s]
-20%	0,42	0,15
zvolená hodnota	0,52	0,30
+20%	0,62	0,50

Pro sušení slámy vychází vliv mezerovitosti jako pro sušení dřevních pilin - což se vzhledem k jejich podobným vlastnostem dá očekávat. V rámci Geldartovy klasifikace částic patří i sláma do skupiny A - tedy mezi částice snadno dosahující fluidace. Výsledné rychlosti v závislosti na mezerovitosti slámy jsou v tabulce níže (Tabulka 17).

Graf 6; Vliv sféricity na fluidní rychlosti pro dřevní piliny, slámu a kukuřici



Tabulka 17; Vliv mezerovitosti na fluidní rychlosti pro slámu

	mezerovitost	fluidní rychlost [m/s]
-20%	0,44	0,22
zvolená hodnota	0,56	0,38
+20%	0,67	0,56

Vliv sféricity částic kukuřice je podstatně větší, než je tomu u dřevní štěpky (zatímco u dřevní štěpky se jedná o rozdíl v řádu jednotek procent, pro kukuřici již platí rozdíl zhruba 15%) (Tabulka 18).

Tabulka 18; Vliv sféricity na fluidní rychlosti pro kukuřici

	sféricita	fluidní rychlost [m/s]
-20%	0,48	0,34
zvolená hodnota	0,60	0,41
+20%	0,72	0,46

Pro částice dřevních pilin je vliv sféricity také znatelnější než je tomu pro dřevní štěpku a tento vliv již nelze zanedbat. Z výsledků (Tabulka 19) jsou patrné velké rozdíly (až 30%) v hodnotách fluidních rychlostí při změnách sféricity.

Tabulka 19; Vliv sféricity na fluidní rychlosti pro dřevní piliny

	sféricita	fluidní rychlost [m/s]
-20%	0,60	0,23
zvolená hodnota	0,75	0,30
+20%	0,90	0,36

Pro sušení slámy vychází vliv sféricity obdobně jako pro sušení dřevních pilin – což se vzhledem k jejich podobným vlastnostem dá očekávat. Výsledky fluidních rychlostí jsou v následující tabulce (Tabulka 20).

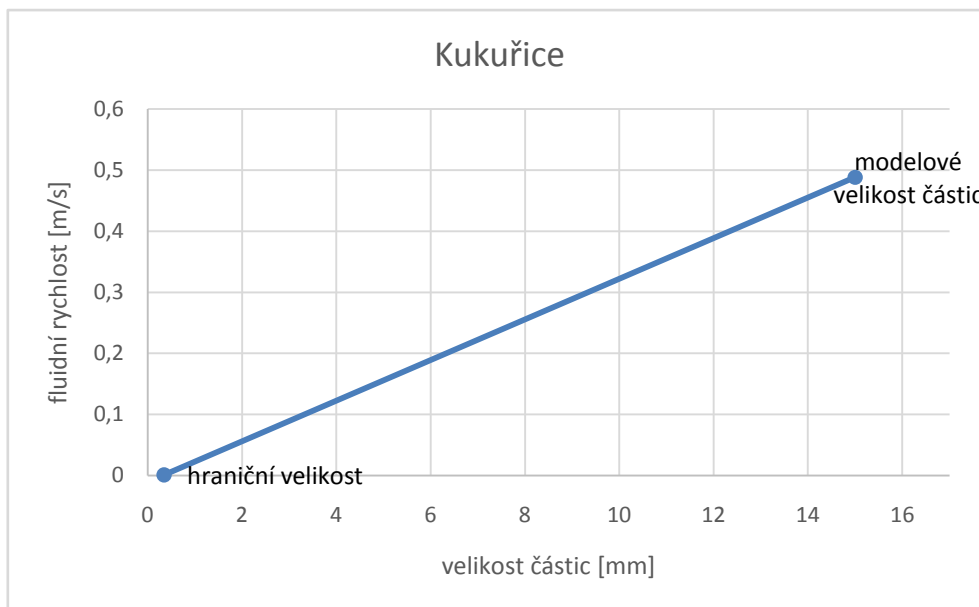
Tabulka 20; Vliv sféricity na fluidní rychlosti pro slámu

	sféricita	fluidní rychlost [m/s]
-20%	0,60	0,30
zvolená hodnota	0,75	0,38
+20%	0,90	0,44

Pro kukuřici jsem pro srovnání také provedl výpočet fluidní rychlosti pro hraniční velikost částic. Pro sušení slámy a dřevních pilin tento výpočet není potřeba, neboť se svou velikostí již nachází mezi částicemi typu A (snadno dosahující fluidace).

Vliv velikosti částic je patrný v grafu a tabulce níže (Graf 7, Tabulka 21).

Graf 7; Závislost velikosti částic na fluidní rychlosti pro kukuřici



Tabulka 21; Vliv velikosti částic na fluidní rychlosti pro kukuřici

	velikost [mm]	fluidní rychlost [m/s]
modelová hodnota	15	0,4885
hraniční velikost dle Geldartovy klasifikace	0,35	0,0008

Vzhledem k hraniční velikosti částic platí stejný závěr jako u dřevní štěpky - částice hraniční velikosti odpovídají jemnému prášku. Fluidní sušení je tedy možné, ačkoliv s obtížemi. Je ovšem třeba také zohlednit k čemu je suchý materiál určen. Kukuřici by tedy bylo vhodnější sušit jiným způsobem, například v rotační nebo pásové sušce.

9.1. Výpočet tlakové ztráty

Na základě stanovené minimální fluidní rychlosti jsem dále stanovil tlakovou ztrátu, ke které dojde během sušení. Pro její určení jsem vycházel z následujících předpokladů

- sušíme 1 kg materiálu
- suška je kruhového průřezu s průměrem $d=4\text{m}$
- výšku uvažujeme $h=4\text{m}$

Z daných parametrů určíme velikost průřezu sušky S a velikost plochy průtoku média.

$$S_{\text{průtoku}} = \varepsilon_{mf} * S_{\text{průřezu}}$$

Pro obě pracovní média (spaliny a suchý vzduch) pak se znalostí minimální fluidní rychlosti lze určit objemový průtok pracovního média suškou.

$$\dot{V} = u_{mf} * S_{průtoku}$$

V následující tabulce (Tabulka 22) jsou zaznamenány hodnoty daných veličin pro použité materiály a dané parametry sušky.

Tabulka 22; Parametry sušky

materiál	$S_{průřezu}[m^2]$	$S_{průtoku}[m^2]$	$\dot{V}_{spaliny}[m^3/s]$	$\dot{V}_{vzduch}[m^3/s]$
dřevní štěpka	12,57	8,84	52,28	52,42
dřevní piliny	12,57	6,53	1,93	1,93
sláma	12,57	6,98	2,75	2,76
kukuřice	12,57	2,09	1,02	1,03

Tlakovou ztrátu určíme ze vztahu (6) z [17, str. 64]

$$\frac{\Delta p_{fr}}{L_m} * g_c = 150 * \frac{(1 - \varepsilon_m)^2}{\varepsilon_m^3} * \frac{\mu * u_0}{(\phi_s * d_p)^2} + 1,75 * \frac{1 - \varepsilon_m}{\varepsilon_m^3} * \frac{\rho_g * u_0^2}{\phi_s * d_p}$$

V následující tabulce (Tabulka 23) jsou hodnoty tlakových ztrát pro jednotlivé materiály při použití rychlostí stanovených pro uvažované velikosti částic, mezerovitosti a sféricity.

Tabulka 23; Tlakové ztráty při použití uvažovaných pracovních médií

materiál	sféricita	mezerovitost	velikost částic [mm]	fluidní rychlost [m/s]	tlaková ztráta při ohřevu spaliny [kPa]	tlaková ztráta při ohřevu vzduchem [kPa]
dřevní štěpka	0,5	0,70	20	5,91	0,799	0,795
dřevní piliny	0,75	0,52	1,5	0,29	0,479	0,478
sláma	0,75	0,56	3	0,39	0,588	0,585
kukuřice	0,6	0,17	15	0,49	4,942	4,919

Z výsledků je patrné, že tlaková ztráta při sušení závisí na změně pracovního média minimálně. Hlavním faktorem pro velikost výsledné tlakové ztráty je velikost fluidní rychlosti, resp. velikost částic.

Pro porovnání jsem provedl stejný výpočet i pro hraniční velikosti částic. Ve srovnání chybí dřevní piliny a sláma, neboť jejich velikost odpovídá částicím typu A dle Geldartovy klasifikace již při prvním výpočtu. Výsledky porovnávacího výpočtu jsou v následující tabulce (Tabulka 24).

Tabulka 24; Tlakové ztráty při použití uvažovaných pracovních médií pro hraniční velikosti částic

materiál	sféricita	mezerovitost	velikost částic [mm]	fluidní rychlost [m/s]	tlaková ztráta při ohřevu spalinami [kPa]	tlaková ztráta při ohřevu vzduchem [kPa]
dřevní štěpka	0,5	0,70	0,3	0.0722	0,799	0,798
kukuřice	0,6	0,17	0,35	0.0007	2,398	2,398

Z výsledků je vidět, že při použití hraničních velikostí částic mohou zásadně klesat díky menší rychlosti i tlakové ztráty při sušení. Jelikož však tlaková ztráta závisí i na výšce a hmotnosti sušené vrstvy, může se (jako v případě dřevní štěpky) stát, že tlaková ztráta s nižší velikostí částic neklesne a zůstane stejná.

10. Závěr

V této práci jsem se zabýval možností fluidního sušení různých typů biomateriálů. Fluidní sušení se díky svým výhodám, především pak energetickým úsporám, dle mého názoru bude i v budoucnosti řadit mezi jeden z hlavních způsobů sušení. Pro dřevní štěpku, která je nejpoužívanější biomasou a v České republice patří mezi majoritní biomaterial pro výrobu tepla a elektrické energie, jsem provedl předběžný bilanční výpočet pro návrh sušky. V modelové situaci pro sušení 1 kg materiálu z 50% na 20% vlhkosti je potřeba 1,1 MJ. Uvažovaným pracovním médiem ve výpočtu jsou spaliny a suchý vzduch.

Z výpočtů minimálních fluidních rychlostí vychází pro dřevní štěpku rychlost pro modelovou situaci 4,19 m/s. Tlaková ztráta při sušení částic této velikosti (20 mm) je 0,80 kPa. Při dosažení hraniční velikosti částic (1 mm) již minimální fluidní rychlost vychází 0,58 m/s při tlakové ztrátě 0,80 kPa.

Ačkoliv velikost kukuřice je srovnatelná s velikostí částic dřevní štěpky, pro dosažení fluidace vlivem výrazně menší mezerovitosti vychází minimální fluidní rychlost 0,49 m/s při tlakové ztrátě 4,94 kPa. Pokud bychom částice nadrtili na hraniční velikost (typ A dle Geldartovy klasifikace) vychází rychlost 0,0008 m/s a tlakové ztráty 2,40 kPa. Navíc hraniční velikost kukuřice odpovídá velmi jemnému prášku – lze tedy konstatovat, že kukuřice se pro fluidní sušení nehodí a bylo by ji třeba sušit například v rotační nebo pásové sušce.

Z výpočtů nejprůhodněji vychází sušení dřevních pilin a slámy, neboť svou velikostí spadají do skupiny A dle Geldartovy klasifikace (snadno dosahující fluidace). Pro dřevní piliny vychází minimální fluidní rychlost 0,30 m/s a pro slámu 0,38 m/s. Tlaková ztráta při sušení dřevních pilin je 0,48 kPa a při sušení slámy 0,59 kPa. Tyto materiály jsou tedy pro fluidní sušení vhodné a fluidní sušení se nabízí jako vhodné řešení.

Z výpočtů vyplývá, že pro sušení dřevní štěpky je potřeba dosáhnout vysokých rychlostí, což vede k vysokým tlakovým ztrátám. Navíc musíme vzít v potaz, že vypočtené rychlosti jsou minimální – tedy v praxi je třeba dosáhnout rychlostí vyšších a i tlakové ztráty pak budou větší. Je ovšem patrné, že pro nižší velikost částic dosahujeme přijatelnějších výsledků. Pokud bychom tedy chtěli fluidně sušit dřevní štěpku, bylo by vhodné uvážit předúpravu materiálu drcením na požadovanou velikost před samotným sušením nebo použití fluidního sušení v kombinaci s mechanickým buzením.

Použitá literatura a zdroje

- [1] GRDZELIŠVILI, Gulnara. *Sušení rostlinných materiálů* [online]. Praha, 2010 [cit. 2018-11-01]. Dostupné z: <http://chps.fsids.cvut.cz/pt2010/pdf/GrdzelisviliGulnara.pdf>. Výzkumná práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Doc. Ing. Pavel Hoffman, CSc.
- [2] Sušení. *Vyšší odborná škola zdravotnická a Střední zdravotnická škola Hradec Králové* [online]. Hradec Králové [cit. 2018-11-01]. Dostupné z: <https://lat.zshk.cz/vyuka/suseni.aspx>
- [3] UTĚŠIL, Tomislav. Suška na biomasu. *BIOM* [online]. Praha, 2010, 1.12.2010 [cit. 2018-11-01]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/suska-na-biomasu>
- [4] ABHIJIT, Borah. *Development of A Solar - Biomass Integrated Drying System for Spice Crops* [online]. Assam University, 2015 [cit. 2018-11-09]. Dostupné z: http://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/96519/2/th-1792_ch2.pdf. Disertace. Assam University, Department of Agricultural Engineering.
- [5] Solar-Biomass Dryer. *Government of India, Ministry of New and a Renewable energy* [online]. Gujarat, India: SPRERI, 2015 [cit. 2018-11-09]. Dostupné z: <https://mnre.gov.in/file-manager/akshay-urja/september-october-2015/EN/30-33.pdf>
- [6] ROOS, Carolyn. Biomass Drying and Dewatering for Clean Heat & Power. *Academia* [online]. Olympia (Washington): WSU, 2008 [cit. 2019-02-19]. Dostupné z: http://www.academia.edu/3116917/Biomass_Drying_and_Dewatering_for_Clean_Heat_and_Power
- [7] GUPTA, C. K. a D. SATHIYAMOORTHY. *Fluid bed technology in materials processing*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, c1999. ISBN 08-493-4832-3.
- [8] Ventilex Fluid Beds – the Shaking Transport. *Ventilex* [online]. BV Heerde (Nizozemí): Ventilex, 2019 [cit. 2019-02-19]. Dostupné z: <http://www.ventilex.com/fluid-bed-technology/>
- [9] *Handbook of industrial drying*. Fourth edition. BocaRaton: M. Dekker, [2015], s. 73. ISBN 978-146-6596-658.
- [10] MUJUMDAR, Arun S. *Handbook of industrial drying*. Fourth edition. BocaRaton: M. Dekker, [2015]. ISBN 978-146-6596-658.

- [11] *Obnovitelné zdroje energie: Obnovitelné zdroje energie v roce 2017* [online]. Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2018, **2017** [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statistika/obnovitelne-zdroje-energie/2018/10/Obnovitelne-zdroje-energie-v-roce-2017.pdf>
- [12] *Synthesis of Amine-Modified Aerogel Sorbents and Metal- Organic Framework-5 (MOF-5) Membranes for Carbon Dioxide Separation* [online]. Arizona, 2010 [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/267250357_Synthesis_of_Amine-Modified_Aerogel_Sorbents_and_Metal-_Organic_Framework-5_MOF-5_Membranes_for_Carbon_Dioxide_Separation. Dizertační. Arizona State University.
- [13] TADEUSZ, Kudra a Mujumdar ARUN S. *Advanced Drying Technologies. Advanced drying technologies*. New York: Marcel Dekker, c2002, s. 69. ISBN 0824796187.
- [14] Arun S. Mujumdar (1996) *Innovation in Drying, Drying Technology*, 14:6, 1459-1475, DOI: [10.1080/07373939608917156](https://doi.org/10.1080/07373939608917156)
- [15] Tepelné vlastnosti. *Mendelova Univerzita v Brně* [online]. Brno: Mendelova Univerzita, 2019 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=9182
- [16] SYROVÝ CSC., Ing. Otakar a Prof. Ing. Miroslav KAVKA DRSC. *Objemové hmotnosti produktů a materiálů. Agronormativy* [online]. Brandýs nad Labem: Agronormativy, 2015 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: http://www.agronormativy.cz/docs/5020001_rslt.html
- [17] KUNII, Daizo a Octave LEVENSPIEL. *Fluidization Engineering* [online]. Druhé. USA: Butterworth-Heinemann, 1991 [cit. 2019-05-22]. ISBN 0-409-90233-0. Dostupné z: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=2ahUKEwiE-eSAgLDiAhXOzKQKHRoIBLIQFjACegQIARAC&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fprofile%2FOmid_Hassanshahi%2Fpost%2FFluidization_Engineering_book_by_Levenspiel_and_Kunii%2Fattachment%2F59d63f8079197b807799be6d%2FAS%253A427490469519360%25401478933078340%2Fdownload%2FFluidization%2BEngineering.pdf&usg=AOvVaw26RURyaHgXgcK7RBIK2laL

Seznam tabulek

Tabulka 1; Srovnání na základě formy sušeného materiálu[9]	15
Tabulka 2; Srovnání sušek na základě rychlosti sušení, [9]	17
Tabulka 3; Srovnání fluidní a vibrační fluidní sušky, [13]	19
Tabulka 4; Úspory energie u vícestupňových sušek [13, str. 361]	23
Tabulka 5; Přehled hmotnosti materiálu v průběhu sušení	24
Tabulka 6; Potřebné energie k ohřevu	24
Tabulka 7; Přehled vlastností vysoušených materiálů	26
Tabulka 8; Rozřazení částic na základě Geldartovy klasifikace	27
Tabulka 9; Přehled vlastností pracovního média sušky.....	27
Tabulka 10; Minimální fluidní rychlost při vysoušení suchým vzduchem	27
Tabulka 11; Minimální fluidní rychlosti při vysoušení spaliny.....	28
Tabulka 12; Vliv mezerovitosti na fluidní rychlosti pro dřevní štěpku	29
Tabulka 13; Vliv sféricity na fluidní rychlosti pro dřevní štěpku.....	29
Tabulka 14; Vliv velikosti částic na fluidní rychlosti pro dřevní štěpku	30
Tabulka 15; Vliv mezerovitosti na fluidní rychlosti pro kukuřici	31
Tabulka 16; Vliv mezerovitosti na fluidní rychlosti pro dřevní piliny	32
Tabulka 17; Vliv mezerovitosti na fluidní rychlosti pro slámu.....	32
Tabulka 18; Vliv sféricity na fluidní rychlosti pro kukuřici.....	33
Tabulka 19; Vliv sféricity na fluidní rychlosti pro dřevní piliny.....	33
Tabulka 20; Vliv sféricity na fluidní rychlosti pro slámu	33
Tabulka 21; Vliv velikosti částic na fluidní rychlosti pro kukuřici	34
Tabulka 22; Parametry sušky.....	35
Tabulka 23; Tlakové ztráty při použití uvažovaných pracovních médií.....	35
Tabulka 24; Tlakové ztráty při použití uvažovaných pracovních médií pro hraniční velikosti částic	36

Seznam grafů

Graf 1; Výroba tepla v České republice v roce 2017, [11]	25
Graf 2; Závislost mezerovitosti na fluidní rychlosti pro dřevní štěpku.....	28
Graf 3; Závislost sféricity na fluidní rychlosti pro dřevní štěpku	29
Graf 4; Závislost velikosti částic dřevní štěpky na fluidní rychlosti	30
Graf 5; Vliv mezerovitosti na fluidní rychlosti pro dřevní piliny, slámu a kukuřici	31
Graf 6; Vliv sféricity na fluidní rychlosti pro dřevní piliny, slámu a kukuřici	32
Graf 7; Závislost velikosti částic na fluidní rychlosti pro kukuřici	34

Seznam obrázků

Obrázek 1; Srovnání sušek - konvenční a nové typy na základě formy sušeného materiálu, [14].....	16
Obrázek 2; Rozdělení sušek na základě formy sušeného materiálu, [9 ,str. 73]	16
Obrázek 3; Geldartova klasifikace částic[12].....	19
Obrázek 4; Schéma vícestupňové sušky, [13, str. 360]	22