

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2022

**VOJTĚCH
JANČÁLEK**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jančálek** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **473458**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Energetika a procesní inženýrství**
Specializace: **Energetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Optimalizace provozu fluidní sušárny

Název diplomové práce anglicky:

Optimization of fluidized bed dryer operation

Pokyny pro vypracování:

Sestavte bilanční model pro sušení dřevní štěpky ve fluidní sušárně a proveďte optimalizaci jejího provozu. Práce bude obsahovat:

1. Zpracování rešerše typů sušáren vhodných pro biomasu a popis procesu sušení.
2. Popis procesu fluidace a hlavních typů fluidních sušáren.
3. Vytvoření bilančního modelu fluidní sušárny se začleněním recirkulace sušícího vzduchu a rekuperace tepla z odchozího vzduchu.
4. Provedení série fluidačních experimentů s dřevní štěpkou a jejich vyhodnocení.
5. Optimalizaci provozních parametrů fluidní sušárny a zhodnocení přínosu rekuperace tepla.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **21.04.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **03.06.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2023**

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

podpis vedoucí(ho) ústav/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Optimalizace provozu fluidní sušárny* vypracoval samostatně s využitím odborné literatury a pramenů uvedených v příloženém seznamu využitých zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Anotační list

Jméno autora:	Bc. Vojtěch Jančálek
Název DP:	Optimalizace provozu fluidní sušárny
Anglický název:	Optimalization of fluidized bed dryer operation
Akademický rok:	2021/2022
Ústav/Obor:	Ústav energetiky/Energetika
Vedoucí DP:	Ing. Jan Havlík, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 77 Počet obrázků: 65 Počet tabulek: 21 Počet příloh: 0
Klíčová slova:	fluidní sušárna; fluidace; sušení; sušárna; optimalizace; bi-omasa; výpočtový model sušárny
Key words:	fluid bed dryer; fluidization; drying; dryer; optimalization; biomass; drying calculation model
Anotace:	Tato diplomová práce zkoumá fluidní sušení biomasy. V práci je zpracován popis procesu sušení a sušárny vhodné pro biomasu. Další část práce se zabývá problematikou fluidace a je vytvořen výpočtový bilanční model dle zadaného schématu. Součástí je také vyhodnocení provedeného experimentu s dřevní štěpkou a porovnání výsledků s teorií. Závěr práce se zabývá optimalizací provozních parametrů fluidní sušárny a zhodnocuje přínos rekuperace tepla.
Abstract:	This diploma thesis examines fluidized drying of biomass. The thesis describes the drying process and dryer suitable for biomass. The next part of the work deals with the issue of fluidization and computational balance model is created according to the given scheme. It also includes an evaluation of the performed experiment with wood chips and a comparison of the results with the theory. The end of the thesis deals with optimisation of fluid bed dryer operating parameters and evaluates benefits of heat recuperation.

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Janu Havlíkovi, Ph.D. za poskytnutí odborných a užitečných rad ve vedení mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině a blízkým za jejich podporu, díky které jsem mohl této práci věnovat maximum času.

Obsah

1	Úvod	- 9 -
2	Proces sušení a sušárny pro biomasu.....	- 10 -
2.1	Sušení biomasy.....	- 10 -
2.1.1	Biomasa pro energetické využití	- 10 -
2.1.2	Voda v biomase	- 11 -
2.1.3	Vliv vlhkosti na výhřevnost/spalné teplo	- 12 -
2.2	Sušárny pro biomasu	- 12 -
2.2.1	Proces sušení	- 12 -
2.2.2	Statika sušení	- 13 -
2.2.3	Kinetika sušení	- 15 -
2.2.4	Rozdělení a typy sušáren	- 16 -
2.2.5	Porovnání sušáren.....	- 19 -
3	Fluidace, hlavní typy fluidních sušáren.....	- 20 -
3.1	Fluidační charakteristiky	- 22 -
3.2	Kinetika fluidního sušení	- 23 -
3.3	Tlaková ztráta fluidní sušárny	- 24 -
3.4	Typy fluidních vrstev	- 24 -
3.5	Typy fluidních sušáren.....	- 26 -
3.6	Optimalizace fluidní sušárny.....	- 27 -
4	Tvorba bilančního modelu fluidní sušárny.....	- 29 -
4.1	Zadání fluidní sušárny.....	- 29 -
4.2	Okrajové podmínky pro výpočet.....	- 32 -
4.3	Fluidační charakteristiky	- 33 -
4.4	Statika bez recirkulace a bez rekuperace	- 35 -
4.5	Statika s recirkulací bez rekuperace	- 37 -
4.6	Statika s recirkulací a s rekuperací.....	- 39 -
4.7	Kinetika	- 41 -
5	Experiment	- 45 -
5.1	Popis experimentálního zařízení	- 45 -
5.2	Materiál pro experiment.....	- 46 -
5.3	Průběh experimentu	- 49 -
5.4	Výpočet prahových rychlostí	- 50 -
5.5	Vyhodnocení experimentu	- 53 -
6	Optimalizace fluidní sušárny.....	- 61 -
6.1	Optimalizace pro jednu fluidní rychlost.....	- 61 -

6.2	Přínos rekuperace	- 66 -
6.3	Optimalizace při různých rychlostech fluidace.....	- 67 -
7	Závěr.....	- 72 -
8	Seznam použitých zdrojů a literatury	- 73 -

Seznam symbolů, indexů a zkratek

Dolní index

in	Vstupní hodnoty	vyp	Vypařování
out	Výstupní hodnoty	zč	Zadaná částice
mat	Materiál	kč	Kulová částice
vz	Vzduch	mt	Mokřý teploměr
sv	Suchý vzduch	rb	Rosný bod
sm	Sušící médium	rek	Rekuperátor/Rekuperovaný
suš	Sušení/Sušárna	fv	Fluidní vrstva
pr	Prahová	ul	V úletu

Horní index

V Vsázkový režim

Symbol

W	[1; %]	Obsah vody
ϕ	[1; %]	Vlhkost
φ	[1; %]	Relativní vlhkost
ω	$[kg_{vody} \cdot kg_{sv}^{-1}]$	Absolutní vlhkost
m	$[kg]$	Hmotnost
M	$[kg \cdot s^{-1}]$	Hmotnostní tok tekutiny/plynu
\dot{V}	$[m^3 \cdot s^{-1}]$	Objemový tok tekutiny/plynu
T	[°C]	Teplota
p	[kPa]	Tlak
Δp	[Pa]	Tlaková ztráta
Q	[kJ; kW]	Teplo
E	$[kW(MW) \cdot kg_{odsuš.vody}^{-1}]$	Energetická náročnost
ζ	[%]	Obsah sušiny
u	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost
k	[1]	Přepočtový součinitel pro určení rychlosti ve fluidní vrstvě
H	[m; mm]	Výška vrstvy
d_m	[m; mm]	Průměr kulové částice
A	$[m^2]$	Průřez fluidní komory
S	$[m^2]$	Povrch částice
V	$[m^3]$	Objem částice
σ	[1]	sféricita
ε	[1]	Mezerovitost
Ar	[1]	Archimedovo číslo
Re	[1]	Reynoldsovo číslo
Pr	[1]	Prandtlovo číslo
Nu	[1]	Nusseltovo číslo
ρ	$[kg \cdot m^{-3}]$	hustota
ρ_s	$[kg \cdot m^{-3}]$	Sypná hmotnost
g	$[m \cdot s^{-2}]$	Gravitační zrychlení
μ	$[Pa \cdot s]$	Dynamická viskozita
ν	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	Kinematická viskozita
α	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	Součinitel prostupu tepla
λ	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	Tepelná vodivost
C_{od}	$[kg_{vody} \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}]$	Měrná odpařivost
c_p	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Součinitel tepelné kapacity za konstantního tlaku
C_D	[1]	Odporový součinitel
h	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Entalpie
R	[1; %]	Recirkulační parametr

1 Úvod

Sušení různých druhů materiálů je rozšířeným procesem, který je pro další využití těchto materiálů nezbytný nebo alespoň ekonomicky výhodný. Mezi nejvýznamnější důvody, proč sušit se řadí především zvýšení výhřevnosti paliva, snazší vznícení paliva, nižší hmotnost pro transport materiálů, menší objem spalin za kotlem po spalování paliv, které prošly procesem sušení a nižší vlastní spotřeba spalovacích zařízení. Nevýhodou je bezpochyby přidané sušící zařízení a nutnost sušárnu zásobovat teplem, případně dalšími energiemi, nejčastěji elektrickou. Pokud je to technologicky možné, lze nevýhodu nutnosti přívodu tepla převrátit na výhodu například využíváním zbytkového tepla spalin na nižších teplotách a tím odbourat potřebu dodávky tepla a zvýšit celkovou účinnost provozu.

Fluidní sušárny nejsou tolik rozšířené jako klasické sušárny, mají ovšem nesporné výhody. Mezi největší výhody se řadí především velmi dobrý přenos tepla mezi sušicím médiem a sušeným materiálem. Další nespornou výhodou je doba zdržení materiálu ve fluidní komoře a menší tepelné ztráty v porovnání s jinými typy sušáren. Nevýhodou je fakt, že pro sušení se musí materiál předupravit (mletí, drcení ...) tak, aby měl vhodnou velikost a jeho částice byly homogenní.

Zdaleka ne všechny materiály jsou ke fluidování vhodné. Tato práce se zabývá těžko fluidovatelnými materiály a porovnává průběh jejich fluidace s průběhem fluidace mnohem lépe fluidovatelného materiálu. Mezi těžko fluidovatelné materiály se řadí např. dřevní štěpka vyrobená z tvrdých dřevin. Tyto materiály jsou hojně využívaným palivem pro spalovací proces, a právě proto je výzkum jejich fluidace přínosný.

V méj diplomové práci je zpracována rešerše typů sušáren vhodných pro biomasu a popis procesu sušení spolu se zpracováním popisu fluidace a hlavních typů fluidních sušáren. Praktická část práce se zabývá vytvořením bilančního modelu fluidní sušárny se začleněním recirkulace sušícího vzduchu a rekuperace tepla z odchozího vzduchu. Pro konkrétní představu, jak jednotlivé materiály mohou fluidovat, je provedena série fluidačních experimentů s dřevní štěpkou a jejich vyhodnocení. Na závěr práce je provedena optimalizace provozních parametrů fluidní sušárny a zhodnocení přínosu rekuperace tepla.

2 Proces sušení a sušárny pro biomasu

2.1 Sušení biomasy

Pod pojmem biomasa se rozumí veškerý materiál účastnící se koloběhu živin v biosféře. Biomasa obecně zahrnuje fytomasu, zoomasu a produkty nebo zbytky jejich existence. Biomasa je řazena do obnovitelných zdrojů, čímž vyjímá fosilní biomasu a rašelinu. [1]

Biomasu můžeme rozdělit na primární a sekundární. Primární biomasa vzniká za přímého působení fotosyntézy. Dle normy ČSN ISO 16559 z roku 2015 zahrnuje primární biomasa veškeré produkty sklizené nebo sebrané z pole nebo lesa, kde vyrostla. Jedná se například o obilí, dřeviny, zbytky z lesního průmyslu nebo zbytky ze zemědělství. Pod pojmem sekundární biomasa se rozumí především vyšší organismy. Dle této normy to jsou zbytky a toky vedlejšího produktu z potravin, krmiv, vláken, dřeva a látek ze zpracování rostlin. Pod tímto pojmem si lze představit například zvířata nebo hnůj. [2]

2.1.1 Biomasa pro energetické využití

Hlavní předností biomasy v energetickém průmyslu je její obnovitelnost. Při využívání v rozumném měřítku lze prohlásit, že se jedná o nevyčerpatelný zdroj. V budoucnosti by měla právě biomasa nahradit část zdrojů na fosilní paliva. Biomasa se považuje za CO₂ neutrální palivo, což znamená, že množství CO₂ uvolněné při spalování je spotřebováno fotosyntézou při růstu rostliny. Nezanedbatelnou výhodou oproti uhlí je nulový (nebo téměř nulový) obsah síry a řádově menší obsah vlastních popelovin (neuvažuje se s přimíšenými popelovinami při dopravě jako je např. písek, štěrk, hlína, aj.). Využití biomasy je velkou podporou pro decentralizaci zdrojů, což napomáhá redukcí velkých centralizovaných zdrojů. Snížením nákladů na přenos a distribuci elektřiny/tepla může částečně pokrýt většinou vyšší náklady obnovitelných zdrojů. [3]

Pro energetické využití lze využít odpadní biomasu, cíleně pěstovanou biomasu nebo čistírenské kaly. Pro energetiku je nejvíce zajímavá z hlediska spalování dřevní štěpka, dřevěné brikety nebo sláma. Z pohledu zplyňování jsou podstatné rostlinné zbytky, cíleně pěstovaná biomasa na polích (kukuřice, obilí) nebo čistírenské kaly. [3]

Odpadní biomasa

Pojem odpadní biomasa zahrnuje odpady z rostlinné nebo živočišné výroby a lesního průmyslu. Největší výhodou je cena těchto zdrojů. Jelikož se jedná o odpady, lze předpokládat, že náklady na jejich pořízení jsou výrazně nižší než za primární biomasu. Do této skupiny lze zařadit například slámu, zbytky po ořezu křovin, dřevní odpady nebo trávu. [3]

Cíleně pěstovaná biomasa

Cíleně pěstovanou biomasu lze rozdělit na dřeviny a byliny. Jendo z možných dělení je možné provést dle dlouholetosti jejich růstu na jednoleté, dvouleté a víceleté. Jednu ze skupin tvoří energetické trávy, jako jsou například sverep horský, psineček veliký, lesknice rákosovitá nebo ozdobnice čínská (nazývána též sloní tráva). [3]

Do další skupiny patří rychle rostoucí dřeviny, kde se mohou uplatnit zkušenosti z lesního hospodářství. Jedná se o dřeviny mající krátkou obmýtní dobou s velkým hmotnostním přírůstkem, který je podstatně větší než u ostatních druhů dřevin. Nejvýznamnějšími dřevinami této kategorie jsou topoly, lze zde ale využít i vrby, břízy, olše nebo akáty. [3]

Čistírenské kaly

Pod pojmem čistírenský kal se rozumí odpadní materiál vzniklý v obytných útvarcích. Zahrnuje především tyto skupiny: tuhý odpad z domácnosti, uliční odpady a odpad z parků nebo zahrad, odpady ze služeb a odpad ze škol, úřadů nebo obchodů. [3]

2.1.2 Voda v biomase

Obsah vody v palivu

Výpočet pro určení obsahu vody W v biomase je zobrazen v rovnici (3.1). Tento vztah vyjadřuje hmotnostní podíl vody ve vlhkém materiálu ku celkové hmotnosti, která lze určit jako součet hmotností sušiny a vody. [4]

$$W = \frac{m_{voda}}{m_{celková}} = \frac{m_{voda}}{m_{voda} + m_{sušina}} \quad [1] \quad (2.1) [4]$$

Vlhkost paliva

Rozdíl mezi vlhkostí ϕ a obsahem vody W je v hmotnosti, ke které se vztahuje hmotnost vody v daném materiálu. U obsahu vody je touto hmotností celková hmotnost a u vlhkosti pouze hmotnost sušiny. Tento vztah pro výpočet vlhkosti je uveden v rovnici (3.2). [4]

$$\phi = \frac{m_{voda}}{m_{sušina}} \quad [1] \quad (2.2) [4]$$

2.1.2.1 Druhy vody v materiálu

Přimíšená voda

Přimíšená, též volná, voda se nepovažuje za součást původního paliva. Tuto vodu lze odstranit pomocí mechanických metod odkapáním nebo odstředěním. [5]

Hrubá voda

Hrubá voda se zjišťuje pomocí hmotnostního úbytku měřeného vzorku při sušení. Sušící médium je vzduch s relativní vlhkostí přibližně 50% a teplotě okolí (místnosti). [5]

Zbylá voda

Zbylá, též hygroskopická, voda je vázána v materiálu kapilárně a zbude po odstranění hrubé vody. Zjišťuje se pomocí hmotnostního úbytku pomocí procesu sušení ve vzdušné sušárně při teplotě v rozmezí 105 °C až 110 °C. [5]

Vázaná voda

Vázaná voda se uvádí nejčastěji v technických rozborech a vyjadřuje součet hrubé a zbylé vody. [5]

Okludovaná voda

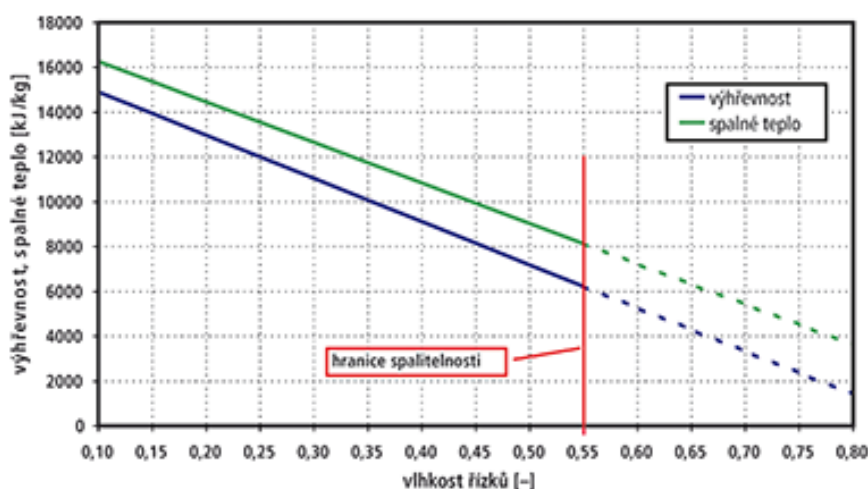
Okludovaná voda označuje nepatrné množství vody, které se adsorbuje do hořlaviny. Při laboratorním rozboru je zahrnuta v prchavé hořlavině paliva. [5]

Hydrátová voda

Hydrátová voda je krystalová voda obsažená v minerálech. Při spalovacím procesu se zahrnuje do popelovin. [5]

2.1.3 Vliv vlhkosti na výhřevnost/spalné teplo

Vliv vlhkosti na výhřevnost, případně spalné teplo daného paliva je nepřímo úměrný. Se zvyšující se vlhkostí klesá hodnota výhřevnosti/spalného tepla. Tato závislost je názorně zobrazena na Obrázku 1, kde autoři uvažovali jako palivo řepné řízky. Hranice spalitelnosti řízků je zde uvedena na 55 % vlhkosti. U ostatních druhů biomasy se obecně tato hranice uvádí přibližně mezi 50 až 60 %. Voda má vliv také např. na celkovou hmotnost materiálů, kterou je nutno řešit při dopravě. S nižší vlhkostí klesá také objem spalin za kotlem po spálení tohoto materiálu a dané spalovací zařízení má menší vlastní spotřebu energií nutných pro provoz. [6]



Obrázek 1: Vliv vlhkosti řepných řízků na výhřevnost a spalné teplo [6]

2.2 Sušárny pro biomasu

Sušárna je zařízení určené k vysoušení vstupního materiálu, případně více materiálů. Jedná se o proces, při kterém je danému materiálu odebírána vlhkost pomocí sublimace nebo vypařování. Během něj se mění podmínky i vlastnosti, a proto jej označujeme jako nestacionární. Voda se ze vstupního materiálu odstraňuje mechanicky (lisy odstředivky), fyzikálně-chemicky (absorpce, adsorpce) nebo pomocí tepla (výparné teplo), což je nejvíce náročný proces z hlediska energií. [7]

Sušení může probíhat nepřímo (kontaktně) přes teplosměnnou plochu, nebo přímo (konvekčně), kdy je sušený materiál přímo ve styku se sušícím prostředím. Tento způsob se dále dělí na povrchové sušení, kde proudí sušící médium podél povrchu sušeného materiálu, a na objemové sušení, kde sušící médium prochází materiálem (např. fluidní sušení). [7]

2.2.1 Proces sušení

Účel sušení

Pomocí procesu sušení je možné využít nespalitelné materiály z důvodu vysokého obsahu vody pro energetické účely. Tyto materiály jsou např. odpady ze zemědělství a potravinářství, mokrá kůra, mokré jehličí a listí apod. [8]

Vysušený materiál je lehčí a tím pádem méně náročný pro přepravu a pro vlastní spalovací proces přináší výhodu vyšší hodnoty výhřevnosti. Sušení biomasy zajišťuje

možnost jejího dlouhodobějšího skladování. Pro materiály, které nejsou určeny ke spalování slouží sušení jako konzervační prostředek. [9]

Typy sušení

Aktivní sušení

Při aktivním sušení je nutná dodávka energie (tepla) z vnějšího zdroje a doba sušení je kratší než u pasivního sušení. V sušárně tedy dochází pokaždé k aktivnímu sušení. Tato metoda je dražší, protože je nutné provozovat zařízení a dodávat energii. Je zde možné využít odpadního tepla z různých technologických procesů. Důležitým parametrem je poměr dodané energie vůči takto získané energii vstupního materiálu (navýšení hodnoty výhřevnosti). [9]

Pasivní sušení

Pasivní sušení je mnohonásobně časově náročnější než aktivní sušení. Vlhkost z materiálu se odvádí samovolně a rychlost sušení je závislá na kvalitě uskladnění. Jedná se o nejlevnější metodu sušení, která ale nemusí být vhodná pro některé druhy spalovacích nebo zplyňovacích zařízení, případně výrobu pelet. [9]

Průběh sušení

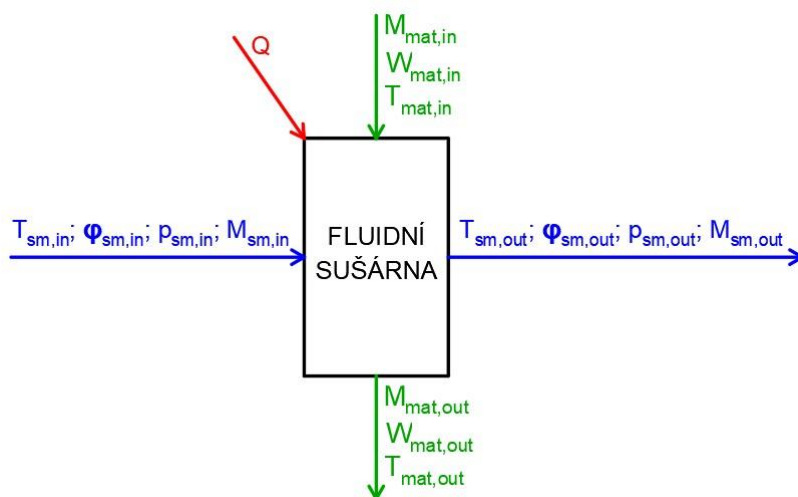
Po vložení sušeného materiálu do sušárny je tento materiál ohřát na teplotu mokrého teploměru. Následuje velmi rychlá absorpce povrchové vody do sušícího média a voda, která je uvnitř materiálu se postupně dostává na povrch, kde je následně také absorbována. Jakmile je materiál vysušený, začne jeho teplota stoupat až na teplotu média v okolí. Čím je teplota vyšší, tím lépe probíhá přestup tepla a rozměry zařízení mohou být nižší. Nevýhodou je zvyšující se riziko požáru. V praxi většinou nedochází k úplnému vysušení, čímž je toto riziko samovolného vznícení sušeného materiálu nižší. [7]

Popis procesu sušení

Popis procesu sušení se dělí na statickou a kinetickou část. Statická část se zabývá energetickou náročností sušení. Kinematická řeší časový průběh sušení. Další nezbytnou částí, která většinou dává podklad pro statiku a kinetiku jsou charakteristiky fluidace. Výstupem této části jsou fluidační rychlosti. [10]

2.2.2 Statika sušení

Statika sušení popisuje materiálové bilance a je v ní zahrnuta i energetická bilance procesu. Pro popis statiky sušení byl vytvořen Obrázek 2, kde jsou vstupy označeny indexy *in* a výstupy *out*. Dolní index *mat* označuje sušený materiál a index *sm* označuje veličiny vztahující se k sušícímu médiu. Pro zlepšení přehlednosti je materiálový vstup i výstup ze sušárny označen zelenou barvou, vzduchový vstup a výstup modrou. Symbol *T* značí teplotu, *p* tlak, *φ* relativní vlhkost, *W* obsah vody a *M* hmotnostní tok. Do sušárny je přiváděno teplo *Q*. Při kontinuálním sušení se uvažuje hmotnostní tok v *kg/s*, při vsázkovém pouze hmotnost v *kg*. [10]



Obrázek 2: Fluidní sušárna – parametry sušícího média a sušeného materiálu

V rovnicích (2.1) až (2.7) je popsána materiálová bilance této sušárny. Množství sušiny, kterou materiál obsahuje se během procesu sušení nemění, změna je pouze v jejím zvýšeném procentuálním zastoupení. Vztah pro výpočet procentuálního zastoupení sušiny ζ je zobrazen v rovnici (2.1). Rovnice (2.2) zobrazuje vztah pro výpočet sušiny materiálu M_s a rovnice (2.3) množství vody M_v na vstupu materiálu do sušárny. [10]

$$\zeta = 1 - W \quad [\%] \quad (2.3)$$

$$M_s = (1 - W_{mat,in}) m_{mat,in} = \zeta_0 \cdot m_{mat,in} \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (2.4)$$

$$M_{v,in} = W_{mat,in} \cdot M_{mat,in} \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (2.5)$$

Hmotnostní bilance sušiny je uvedena v rovnici (2.4). Tato bilance vychází z neměnnosti hmotnosti sušiny během procesu.

$$M_s = M_{mat,in} \cdot \zeta_{in} = M_{mat,out} \cdot \zeta_{out} \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (2.6)$$

V rovnici (2.5) je zobrazen vztah pro výpočet měrného odsušení ΔW . [10]

$$\Delta W = \frac{W_{mat,in} - W_{mat,out}}{1 - W_{mat,out}} \quad [kg_{vody} \cdot kg_{mat}^{-1}; \%] \quad (2.7)$$

Vztah pro výpočet množství odsušené vody $M_{\Delta W}$ ze vstupního materiálu je zobrazen v rovnici (2.6) při uvažovaném odsušení na stav $W_{mat,out}$. [10]

$$M_{\Delta W} = \Delta W \cdot M_{mat,in} \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (2.8)$$

Pomocí vztahu v rovnici (2.7) lze určit hmotnost vysušeného materiálu $M_{mat,out}$ po jeho odsušení na vlhkost $W_{mat,out}$. Tato rovnice byla vytvořena pomocí hmotnostní bilance. [10]

$$M_{mat,out} = M_{mat,in} - M_{\Delta W} \quad [kg \cdot s^{-1}] \quad (2.9)$$

Rovnice (2.8) popisuje energetickou náročnost procesu sušení $E_{suš}$, která se určí jako poměr tepla Q potřebného pro odpaření 1 kg vody z daného sušeného materiálu a množství odsušené vody. Obvykle se energetická náročnost sušení odhaduje přibližně okolo 3 MJ/kg_{odsušené vody}. Pro zvýšení přesnosti odhadu je nutné započíst tepelné ztráty. U kontaktních sušáren se většinou tato ztráta uvažuje mezi 2 až 5 % $E_{suš}$. Pro konvektivní sušárny přibývá ztráta tepla odvedeného sušicím médiem a její velikost závisí na teplotě odchozího média, nejčastěji vzduchu. [10]

$$E_{suš} = \frac{Q_{od}}{M_{\Delta W}} \quad [kW(MW) \cdot kg_{odsuš.vody}^{-1}] \quad (2.10)$$

Celkovou potřebu tepla $Q_{suš}$ pro sušení lze určit jako sumu dílčích tepel. Jedná se o teplo pro ohřev materiálu na teplotu mokrého teploměru (Q_{mat}), teplo potřebné pro vypaření požadovaného množství vody (Q_{vyp}), teplo pro ohřev sušícího média z teploty okolí na požadovanou výstupní teplotu, která musí být vyšší, než je teplota mokrého teploměru na výstupu ze sušárny (Q_{sm}) a teplo pro přehřátí vypařené vodní páry z teploty mokrého teploměru (= teplota vypařování) na teplotu výstupního vzduchu ze sušárny ($Q_{přeh}$). Tento součet dílčích tepel je názorně popsán rovnicí (2.9). Při kontinuálním sušení vychází potřebné množství tepla v jednotkách kW, pro vsázkové sušení v kJ. [10]

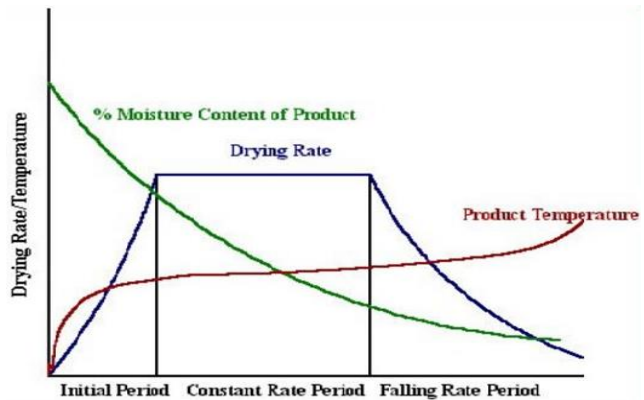
$$Q_{suš} = Q_{mat} + Q_{vyp} + Q_{sm} + Q_{přeh} \quad [kW; kJ] \quad (2.11)$$

2.2.3 Kinetika sušení

Kinetika sušení popisuje časový průběh sušení. Vzhledem ke složitosti výpočtu se zde uplatňují zkušenosti z již stávajících provozů. K návrhu, včetně dimenzování sušáren, se využívají sušící charakteristiky, které se určují experimentálně a platí vždy pouze pro daný typ sušárny, typ sušeného materiálu a okrajové podmínky sušení. Těmito charakteristikami jsou sušící křivky, měrná plošná odpařivost [$kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$] (= množství vody odpařené z jednotkové plochy otápěného povrchu za jednotku času, většinou za jednu hodinu) a měrná objemová odpařivost [$kg \cdot m^{-3} \cdot h^{-1}$] (množství vody odpařené z jednotkového otápěného objemu za jednotku času, většinou za jednu hodinu). [10]

Sušící křivka

Sušící křivka popisuje průběh rychlosti sušení a teploty v čase. Názorně je zobrazena na Obrázku 3. Celé sušení lze rozdělit do tří period. V první, na obrázku pojmenována *Initial Period*, dochází k prudkému nárůstu sušící rychlosti až na maximální hodnotu. Spolu s rychlostí stoupá i teplota, přičemž je většina přivedeného tepla spotřebována na ohřev sušeného materiálu. Druhá perioda, na obrázku nazvána *Constant Rate Period*, značí sušení materiálu při vysoké teplotě a konstantní rychlosti sušení. Z materiálu je odváděna vlhkost až do bodu, který se označuje kritická vlhkost. Ve třetí periodě, na obrázku označené *Falling Rate Period*, dochází k poklesu sušící rychlosti. V této fázi materiál neobsahuje dostatečné množství vlhkosti k bezpečnému sušení při maximální rychlosti ohřevu. [10] [11]



Obrázek 3: Sušící křivka [11]

2.2.4 Rozdělení a typy sušáren

Rozdělení sušáren lze provést:

Dle typu přívodu tepelné energie [12]

- Konvektivní
- Konduktivní
- Radiační

Dle provozního tlaku sušícího prostředí [12]

- Přetlaková
- Vakuová
- Atmosférická

Dle možnosti přesunu sušeného materiálu [12]

- Mechanická
- Pneumatická
- V klidu

Dle sušícího média [12]

- Vzduch
- Spaliny
- Přehřátá pára

Šneková sušárna

Ukázka šnekové sesypané sušárny je zobrazena na Obrázku 4. Materiál je ze vstupního zásobníku dopraven na sušící šneky pomocí dopravníku. Jako sušícího média se zde využívá horký vzduch, který je dopravován do sušící komory. Výhodou je možnost využití odpadního tepla z kogeneračních jednotek, případně z jiných zdrojů. Kapacitu sušárny určují především parametry: teplota a množství sušícího média, rychlost posunu šneků. Sušeným materiálem mohou být zemědělské produkty (např. řepný řízek, seno, kukuřice, travní senáž), kaly, piliny, výlisky a digestát (odpad z bioplynové stanice). [13]



Obrázek 4: Šneková sesypaná sušárna [13]



Obrázek 5: Nízkoteplotní fluidní sušárna typu FDS [14]

Sušárna s fluidní vrstvou

V sušárně s fluidní vrstvou probíhá sušení následujícím způsobem. Sušený materiál je nadnášen proudem sušícího média (plynu), který materiálem prostupuje a tím je zajištěno co nejdokonalejší obtékání částic materiálu sušícím médiem. Fluidní sušárny díky tomuto efektu dosahují jedny z nejlepších hodnot přestupů tepla. Nevýhodou je nutná předúprava fluidovaného materiálu, např. drcení. Tento typ sušárny má menší tepelné ztráty než ostatní typy, čímž je zajímavý pro ekonomiku provozu. Na Obrázku 5 je zobrazena fluidní sušárna FDS od společnosti CENTRIVIT, spol. s.r.o. určená k vysoušení mechanicky odvodněného kalu. Výstupní materiál obsahuje méně než 10 % vody a využívá se zde nepřímého kontaktu s topným médiem, které ohřívá sušící plyn ve výměňkové stanici. Celá sušárna je inertně uzavřena. [14]

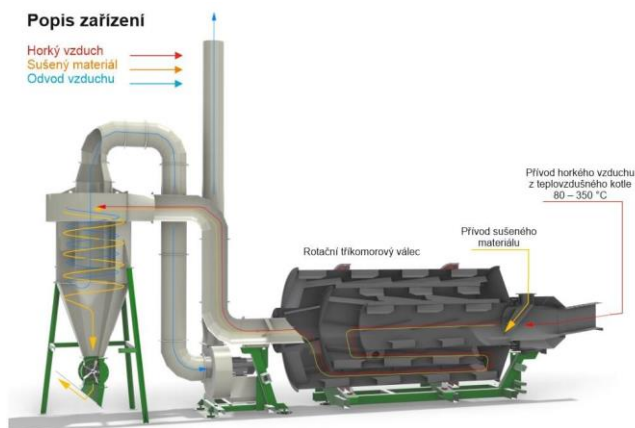
Výstupní materiál obsahuje méně než 10 % vody a využívá se zde nepřímého kontaktu s topným médiem, které ohřívá sušící plyn ve výměňkové stanici. Celá sušárna je inertně uzavřena. [14]

Rotační sušárna

Rotační sušárny slouží výhradně k sušení sypkých materiálů. Často se využívá spojení s bubnovou sušárnou v jeden celek. Na Obrázku 6 je zobrazena vakuová sušárna od firmy MIX BRNO, spol. s.r.o. [15]



Obrázek 6: Vakuová rotační sušárna [15]



Obrázek 7: Schéma bubnové sušárny [16]

Bubnová sušárna

Bubnová sušárna funguje na principu rotace bubnu kolem své osy. Přesýpaní a otáčení vstupního sušeného materiálu je zajištěno surnými lopatkami, které zároveň sunou sušený materiál k odsávací komoře. Zde je vysušený materiál odsáván odtahovým ventilátorem a přes odlučovač je dopraven do zásobníku. Na Obrázku 7 je zobrazeno schéma bubnové sušárny. [16]

Pásová sušárna

U pásové sušárny je vstup i výstup sušeného materiálu do sušárny zajištěn pomocí dopravníků. Uvnitř sušárny je materiál posouván na několika pásech, kolem kterých proudí sušící médium (nejčastěji vzduch). Tloušťka vrstvy materiálu na pásu se pohybuje přibližně mezi 15 až 20 centimetry. [17] [18]

Tento typ sušáren je určen především pro zemědělské plodiny, jako jsou například: chmel, obiloviny, vojtěška, kukuřice nebo slunečnice. Pro energetické využití lze sušárnu využít k sušení dřevní štěpky. Sušící médium je do sušárny vháněno ventilátory, následně je armaturami přivedeno k tryskám difuzoru, odkud ofukuje sušící materiál po celé délce pásu. Vlhký vzduch je spolu s jemnými částicemi odsáván odtahovým ventilátorem skrze odlučovač pevných částic pryč ze zařízení. Regulace sušícího média je řízena pomocí klapek, pomocí kterých lze regulovat tlak v jednotlivých úsecích sušárny. [17] [18]

Na Obrázku 8 je zobrazena pásová sušárna BD12, kterou vyrábí firma SEGOPAL TECH s.r.o. [18]



Obrázek 8: Pásová sušárna [17]

2.2.5 Porovnání sušáren

V Tabulce 1 jsou vypsány výhody, nevýhody a možnosti sušeného materiálu jednotlivých typů sušáren.

Tabulka 1: Porovnání sušáren [19] [20] [21] [22]

Typ sušárny	Výhody	Nevýhody
Šneková	<ul style="list-style-type: none"> • Velký rozsah výkonů a příslušenství • Snadné přizpůsobení výrobním prostorám • Nízké opotřebení • Nízké náklady na údržbu • Snadná obsluha • Možnost využití odpadního tepla z kogeneračních jednotek 	<ul style="list-style-type: none"> • Nízký přestup tepla mezi sušícím médiem a sušeným materiálem • Vysoké nároky na množství sušícího média
Fluidní	<ul style="list-style-type: none"> • Velký rozsah sušeného materiálu • Využití pro zrnité materiály s různou hrubostí • Rychlé sušení • Dostatečná doba zdržení materiálu ve fluidní komoře • Vysoké hodnoty přestupu tepla • Vyšší tepelná účinnost než u jiných typů sušáren 	<ul style="list-style-type: none"> • Některé materiály jsou obtížně fluidovatelné • Nutná předúprava materiálu (mletí, drcení ...) • Přídavné energetické procesy (mlýny, drtiče) – celkově složitější zařízení
Rotační	<ul style="list-style-type: none"> • Nízké provozní náklady • Jednoduchá obsluha • Nízké provozní náklady 	<ul style="list-style-type: none"> • Lze sušit pouze sypaný materiál • Nižší přestup tepla než u fluidní sušárny
Bubnová	<ul style="list-style-type: none"> • Nízké provozní náklady • Jednoduchá obsluha • Nízké provozní náklady 	<ul style="list-style-type: none"> • Lze sušit pouze sypaný materiál • Nižší přestup tepla než u fluidní sušárny
Pásová	<ul style="list-style-type: none"> • Jednoduchá údržba • Nízké náklady na údržbu • Rychlý nájezd/odstavení • Velký rozsah sušeného materiálu 	<ul style="list-style-type: none"> • Nízký přestup tepla mezi sušícím médiem a sušeným materiálem • Vysoké nároky na množství sušícího média

Z Tabulky 1 je patrné, že fluidní sušárny jsou nejlepší z hlediska přestupu tepla. Tento fakt je způsoben především tím, že při fluidaci je částice materiálu obtékána sušícím médiem téměř po celé její ploše. Zatímco u ostatních typů sušáren je vytvořena vrstva materiálu, který se sice může různými způsoby pohybovat (míchání, vibrace, rotace, apod.), nicméně zde nedochází k tak vysokému kontaktu mezi materiálem a sušícím médiem. Hlavní nevýhodou fluidního sušení je nutná předúprava většiny materiálů. [19] [20] [21] [22]

3 Fluidace, hlavní typy fluidních sušáren

Při fluidaci vzniká suspenze tvořená pevným materiálem (sušený materiál, palivo) a tekutinou nebo plynem proudícím v opačném směru působení zemské tíže. Vzniklá směs vyplní nádobu do určité výšky a uvnitř směsi se částice materiálu intenzivně pohybují. Tato vrstva směsi (sespenze) se nazývá fluidní vrstvou H_{fv} . Rychlost ve fluidní vrstvě u_{fv} je definována mezi prahovou rychlostí fluidace u_{pr} a rychlostí úletu pevných částic u_{ul} . [23]

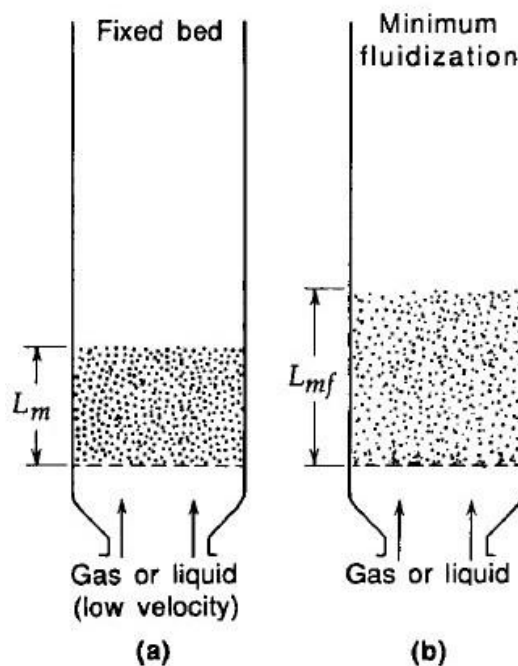
Chování materiálu ve fluidní vrstvě je definováno rychlostí ve fluidní vrstvě, kterou lze určit pomocí vztahu uvedeném v rovnici (2.1), kde \dot{V} značí objemový tok tekutiny/plynu a A značí průřez fluidní komory. Pro tuto rychlost platí: $u_{fv} \in \langle u_{pr}; u_{ul} \rangle$. [23]

$$u_{fv} = \frac{\dot{V}}{A} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (3.1) [23]$$

Průběh fluidace

Jestliže fluidační médium proudí směrem vzhůru ložem jemných částic při nízkém průtoku, médium pouze prosakuje mezerami mezi pevnými částicemi, které jsou v klidu. Tato možnost je znázorněna na Obrázku 9a). Při zvýšení průtoku média se částice začnou vzdalovat a některé i vibrovat, čímž docílí pohybu v omezené oblasti. Autoři zde označili výšku fluidní vrstvy symbolem L Anglický název *Fixed bed* zde znamená pevné lože a *Gas or liquid* plyn nebo tekutina. [7]

Při dalším zvýšení rychlosti proudění (průtoku) se dosáhne bodu, kdy se třecí síla mezi částicemi a médiem vyrovná tíhové síle částice. Vertikální složka tlakové síly působící mezi sousedními částicemi zmizí. V tomto případě lze konstatovat, že pokles tlaku v jakékoli části fluidní vrstvy se přibližně rovná součtu hmotností média a částic v této části. Tento případ je zobrazen na Obrázku 9b). Anglický název *Minimum fluidization* znamená případ minimální fluidace. [7]



Obrázek 9: Průběh fluidace [7]

Rozdělení materiálů dle Geldarta

Pečlivé studování různých druhů a velikostí pevných materiálů při fluidizaci umožnilo sestavit Geldartův diagram od stejnojmenného autora. Graf je znázorněn na Obrázku 10. V tomto grafu jsou zakresleny celkem čtyři skupiny materiálů dle jejich střední velikosti (osa x) a hustoty (osa y). Z grafu je patrné, že nejmenší částice obsahuje skupina C. Se zvětšující se velikostí částice se ze skupiny C přechází do skupiny A, dále pak do skupiny B a největší částice obsahuje skupina D. Fluidačním médiem je pro všechny skupiny plyn (vzduch). [7]

Skupina A

Tato skupina obsahuje materiály s malou střední velikostí částic, nízkou hustotou (menší než přibližně $1,4 \text{ g/cm}^3$) a takové materiály, které lze provzdušnit. Fluidizace materiálů patřící do této skupiny probíhá při plynulé fluidizaci s nízkými rychlostmi plynu nebo řízeným probubláváním fluidní vrstvy s malými bublinami při vyšších rychlostech plynu. [7]

Skupina B

Do této skupiny jsou zařazeny materiály s velikostí částic mezi $40 \text{ }\mu\text{m}$ a $500 \text{ }\mu\text{m}$ a hustotou větší než $1,4 \text{ g/cm}^3$, ale zároveň menší než 4 g/cm^3 . Jedná se hlavně o písky. Materiály v této skupině lze dobře fluidizovat při intenzivním probublávání fluidní vrstvy se zvětšujícími se bublinami. [7]

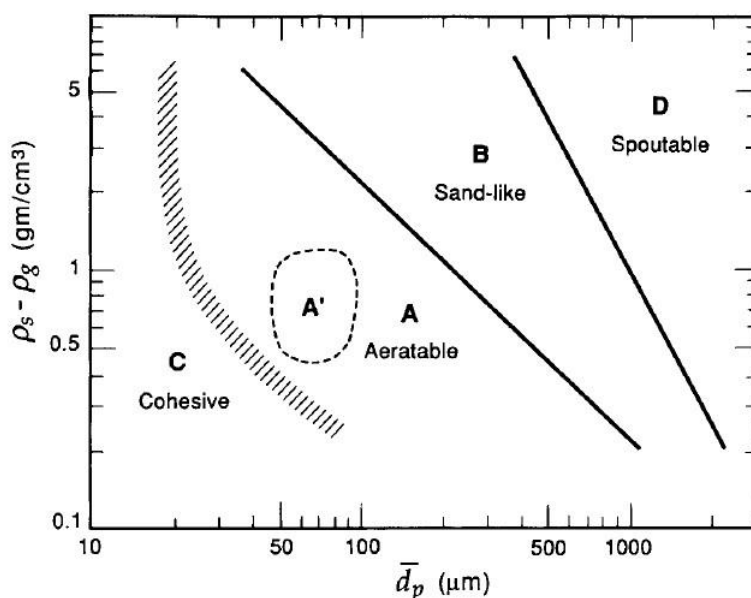
Skupina C

V této skupině materiálů jsou obsaženy velmi jemné nebo soudržné prášky. Fluidizace takovýchto materiálů je velmi obtížná z důvodu mezičásticových sil, které jsou větší než síly vyvolané fluidačním médiem. Jedná se např. o mouku nebo škrob. [7]

Skupina D

Skupina D obsahuje vylévatelné a velké částice s velkou hustotou. Silné fluidní vrstvy složené z těchto materiálů se obtížně fluidizují z důvodu jejich nevyzpytatelného chování, obtížného a nerovnoměrného usměrňování nebo chrlení při distribuci fluidačního média. Do této skupiny lze zařadit např.: obilí, luštěniny, uhlí nebo kávová zrna. [7]

Výhodou použití Geldartova grafu je jasná klasifikace pro jakoukoli pevnou látku o známé hustotě a střední velikosti částic předpokládaného typu fluidace. Graf zahrnuje široké pásmo materiálů a je vhodným nástrojem při návrhu fluidačních zařízení. [7]



Obrázek 10: Geldartův diagram [7]

3.1 Fluidační charakteristiky

Pro výpočty fluidačních charakteristik, kterými jsou především prahová a úletová rychlost fluidace, je nutné znát určité parametry sušeného materiálu. Těmito parametry jsou například: hustota, sypná hmotnost, rozměry částice a průměr částice. Pro nekruhové částice lze využít veličiny, která se nazývá sféricita ϕ , která udává, jak moc se daná částice podobá kouli či nikoli. Tato veličina lze vypočítat jako poměr povrchu koule se stejným objemem jako dané těleso ku povrchu tělesa. Vzorec pro výpočet je uveden v rovnici (3.2). [24]

$$\sigma = \frac{S_{koule}}{S_{těleso}} \quad [1] \quad (3.2) [24]$$

K určení prahové rychlosti fluidace se využívají podobnostní čísla. V rovnici (3.3) je zobrazen vztah pro výpočet Archimedova čísla Ar a v rovnici (3.4) Reynoldsova čísla Re . Z těchto dvou podobnostních čísel lze vypočítat mezerovitost ε podle Todese a Goroška experimentálním vztahem uvedeným v rovnici (3.7). Jestliže není známa rychlost u , alternativní výpočet Reynoldsova čísla Re se může provést např. dle rovnice (3.5), ze které je nutné hodnotu Re vyjádřit tak, jak je provedeno v rovnici (3.6). Rovnice (3.5) je zjednodušená Ergunova rovnice. Zjednodušení provedli autoři Wen a Yu, přičemž je rovnice platná pro částice větší než 100 μm . Kompletní Ergunova rovnice je zobrazena v rovnici (3.8) a je jednou z možných dalších korelací pro výpočet prahové rychlosti fluidace. Tento vztah je velmi citlivý na přesné určení všech veličin v něm vystupujících, zejména pak mezerovitost fluidní vrstvy. V rovnicích (3.3) a (3.4) značí d_m průměr kulové částice, ρ_m hustotu fluidizačního média, ρ_{mat} hustotu fluidovaného materiálu, u rychlost fluidizačního média, μ dynamickou viskozitu a g je gravitační konstanta. [25] [26] [27]

$$Ar = \frac{d_m^2 \cdot \rho_m \cdot (\rho_{mat} - \rho_m) \cdot g}{\mu^2} \quad [1] \quad (3.3) [26]$$

$$Re = \frac{d_m \cdot u \cdot \rho_m}{\mu} \quad [1] \quad (3.4)$$

$$Ar = 24,5 \cdot Re^2 + 1650 \cdot Re \quad [1] \quad (3.5) [27]$$

$$Re = \sqrt{33,7^2 + 0,0408 \cdot Ar} - 33,7 \quad [1] \quad (3.6)$$

$$\varepsilon = Ar^{-0,21} \cdot (18 \cdot Re + 0,36 \cdot Re^2)^{0,21} \quad [1] \quad (3.7) [25]$$

$$Ar = \frac{1,75}{\varepsilon^3 \cdot \sigma} Re^2 + 150 \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3 \cdot \sigma^2} Re \quad [1] \quad (3.8) [26]$$

Mezerovitost lze vypočítat ze známých hodnot hustoty materiálu ρ_{mat} a sypné hmotnosti ρ_s z rovnice (2.16). [25]

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_{mat}} \quad [1] \quad (3.9) [25]$$

Výpočet úletové rychlosti u_{ul} lze provést pomocí rovnice (3.11), která vychází z teorie pádové rychlosti částice v tekutině. Koeficient C_D vyjadřuje odpor částice, pro který existuje celá řada teorií a rovnic pro jeho určení. Byl vybrán příklad určení koeficientu C_D uvedený v rovnici (3.10). [26]

$$C_D = \frac{24}{Re} \cdot (1 + 8,1716 \cdot e^{-4,0655 \cdot \phi} \cdot Re^{0,0964+0,5565 \cdot \phi}) + \frac{73,69 \cdot e^{-5,0748 \cdot \phi} \cdot Re}{Re + 5,378 \cdot e^{6,2122 \cdot \phi}} \quad (3.10) [26]$$

$$u_{ul} = \left(\frac{4 \cdot d_m \cdot (\rho_s - \rho_m) \cdot g}{3 \cdot \rho_m \cdot C_D} \right)^{0,5} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3.11) [26]$$

Pokud je znám průřez sušárny $A_{suš}$, lze určit objemový tok sušícího média M_{sm} sušárnou pomocí rovnice kontinuity. Výpočet je uveden v rovnici (3.12). V rovnici (3.13) je tento vztah přepočten na hmotnostní tok sušícího média.

$$M_{sm} = u_{sm} \cdot A_{suš} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3.12)$$

$$M_{sm} = u_{sm} \cdot A_{suš} \cdot \rho_{sm} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3.13)$$

3.2 Kinetika fluidního sušení

Konkrétní předávaný tepelný výkon v sušárně $Q_{suš}$ mezi sušeným materiálem a sušícím médiem lze určit pomocí obecného vztahu pro výpočet výkonu tepelného výměníku uvedeném v rovnici (3.14). V této rovnici značí S_{mat} povrch všech částic sušeného materiálu ve fluidní sušárně, který je obtékán sušícím médiem. Součinitel prostupu tepla α je možné převzít z odborné literatury. Jeho určení je poměrně složité a v průběhu sušení se jeho hodnota mění. Logaritmický teplotní spád ΔT_{ln} lze určit pomocí aproximace na protiproudý tepelný výměník mezi sušícím médiem a sušeným materiálem.

$$Q_{suš} = \alpha \cdot S_{mat} \cdot \Delta T_{ln} \quad [\text{W}; \text{kW}] \quad (3.14)$$

V rovnicích (3.15) až (3.18) je popsán možný teoretický postup pro výpočet součinitele prostupu tepla platný pro fluidní sušárny. Nejprve je nutný výpočet Prandtlova čísla. Možný postup je uveden v rovnici (3.15), kde λ značí tepelnou vodivost sušícího média a μ dynamickou viskozitu sušícího média. Následuje výpočet Nusseltova čísla, jehož možný výpočet pro $0,1 < Re < 50$ je uveden v rovnici (3.16) a pro $50 < Re < 10\,000$ v rovnici (3.17). V rovnici (3.18) je uveden vztah pro výpočet součinitele prostupu tepla α v závislosti na průměru kruhové částice, tepelné vodivosti a Nusseltově čísle. [28] [29]

$$Pr = \frac{c_{p,sm} \cdot \mu_{sm}}{\lambda_{sm}} \quad [1] \quad (3.15)$$

$$Nu = 0,0282 \cdot Re^{1,4} \cdot Pr^{0,33} \quad [1] \quad (3.16) [28]$$

$$Nu = 1,01 \cdot Re^{0,48} \cdot Pr^{0,33} \quad [1] \quad (3.17) [28]$$

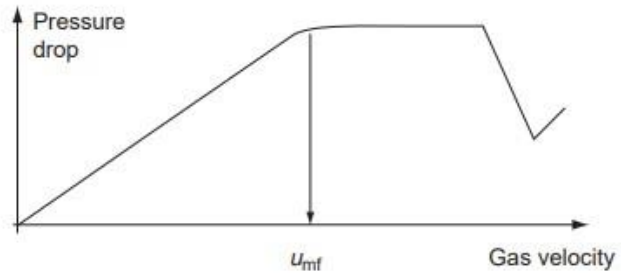
$$\alpha = \frac{\lambda}{d_m} \cdot Nu \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (3.18) [28]$$

Při výpočtu součinitele prostupu tepla α lze postupovat také přes měrnou odpařivost c_{od} . Zdroj [28] uvádí rozpětí měrné odpařivosti pro fluidní sušárny v rozmezí $5 \div 100 \text{ kg}_{vody} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$. Jestliže je známa hodnota potřeby tepla Q v kJ potřebná pro sušení a celkové požadované množství vody pro vysušení ΔW_{mat} , lze hodnotu součinitele prostupu tepla vypočítat z rovnice (3.19). [28]

$$\alpha = \frac{Q \cdot c_{od} \cdot V_{mat}}{\Delta W_{mat} \cdot S_{mat} \cdot \Delta T_{ln}} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (3.19)$$

3.3 Tlaková ztráta fluidní sušárny

Tlaková ztráta (*Pressure drop*) ve fluidní vrstvě je závislá mimo jiné na rychlosti sušícího plynu (*Gas velocity*). Při zvyšování rychlosti přímo úměrně narůstá tlaková ztráta vrstvy až do okamžiku, kdy je dosažena prahová rychlost fluidace (u_{mf}). Po tomto okamžiku je tlaková ztráta téměř konstantní až do bodu, kdy je dosažena úletová rychlost. Poté začínají z vrstvy vylétávat částice sušeného materiálu a tlaková ztráta klesá. Závislost rychlosti sušícího média na ztrátě fluidní vrstvy je zobrazena na Obrázku 11, kde u_{mf} označuje prahovou rychlost fluidace. [28]



Obrázek 11: Závislost tlakové ztráty fluidní vrstvy na rychlosti [28]

Výpočet tlakové ztráty ve fluidní vrstvě Δp_{fv} lze provést dle rovnice (3.20). [27]

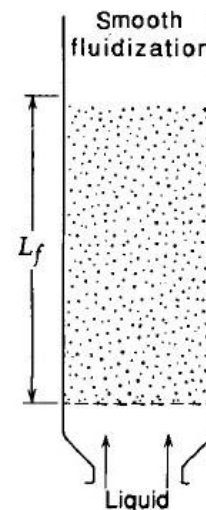
$$\Delta p_{fv} = \frac{150 \cdot H_{fv} \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot \mu}{\varepsilon^2 \cdot \phi^2 \cdot d_m^2} \cdot u + \frac{1,75 \cdot H_{fv} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \rho_m}{\varepsilon^2 \cdot \phi \cdot d_m} \cdot u^2 \quad (3.20) [27]$$

3.4 Typy fluidních vrstev

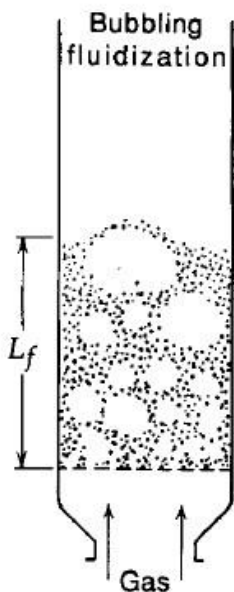
Kapalina může být fluidačním médiem pouze u rovnoměrné fluidní vrstvy. Pro ostatní typy fluidních vrstev je fluidační médium v plynné formě. Následující fluidní typy vrstev nastávají po překročení stavu zobrazeném na Obrázku 11b). Pro systémy pracující s plynem obecně platí, že pevný materiál by měl být rozmělněn na malé lehké částice a plyn by měl mít vysokou hustotu při vysokém tlaku. [7]

Rovnoměrná fluidní vrstva

U systému, kde je fluidačním médiem kapalina, případně za specifických podmínek plyn s velkou hustotou při vysokém tlaku při použití jemných částic s malou hmotností, se další navýšení rychlosti fluidace projeví obvykle hladkým a progresivním roztahováním fluidní vrstvy. Suspenze se při těchto podmínkách stává nehomogenní. Ukázka rovnoměrné fluidní vrstvy (*Smooth fluidization*) je zobrazena na Obrázku 12. [7]



Obrázek 12: Rovnoměrná fluidní vrstva [7]



Obrázek 13: Bublající fluidní vrstva [7]

Bublínková fluidní vrstva

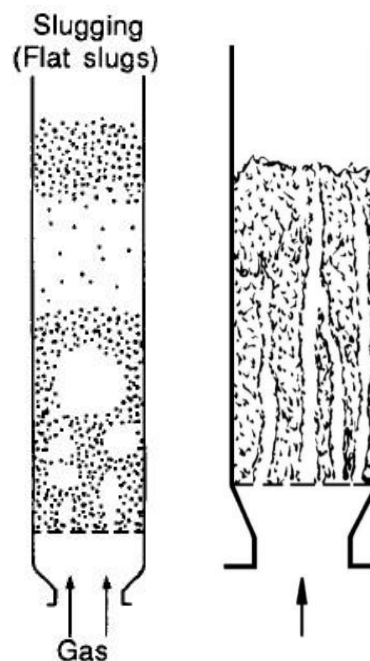
Bublínková fluidní vrstva (*Bubbling fluidization*) se vyznačuje velkou nestabilitou v probublávání a usměrňování plynu. Při větším navýšení rychlosti proudění dochází k intenzivnějšímu pohybu částí pevného materiálu. Obecně lze tento typ popsat tak, že plyn vytváří v promíchané suspenzi různě velké bubliny, které stoupají vzhůru ve směru proudění. Tyto bubliny vznikají větší části v oblastech kolem osy válcové nádoby, ve které fluidace probíhá. Naopak po okrajích padá vnesený pevný materiál zpět dolů. Znárodnění bublínkové fluidní vrstvy je znázorněno na Obrázku 13. [7]

Pístová fluidní vrstva

Pístová fluidní vrstva (*Slugging*) vzniká při použití hrubých pevných částic. Část těchto částic fluidního lože je tlačena bublinami vzduchu vzhůru jako u pístu. Následně tyto částice odpaávají („prší“) zpět do spodního fluidního lože, kde probíhá bublající fluidace. Odtud jsou opět vynášeny nahoru do „pístové“ části. Zobrazení tohoto typu fluidace je na Obrázku 14. [7]

Kanálková fluidní vrstva

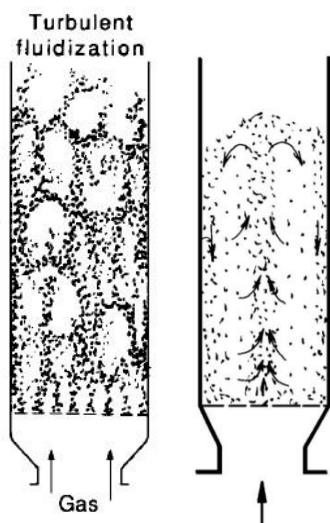
Kanálková fluidní vrstva vzniká za předpokladu užití pevného materiálu, který se obtížně uvádí do fluidace. Jde například o lepkavé materiály, méně vhodný tvar pro fluidaci (tyčový, plochý) nebo částice, které se navzájem elektrostaticky přitahují. Ve fluidní vrstvě se působením plynného fluidačního média vytvoří kanálky, které v průběhu času mění svoji polohu. Tento typ se obzvláště vyskytuje při použití dlouhých a úzkých fluidačních nádob a jeho znázornění se nachází na Obrázku 15. [7]



Obrázek 14: Pístová fluidní vrstva [7]

Obrázek 15: Kanálková fluidní vrstva [35]

Turbulentní fluidace



Obrázek 16: Turbulentní fluidace [7] [35]

Při použití dostatečně vysoké rychlosti (průtoku) plynu, která překročí konečnou rychlost pevných látek, se rozpadne horní část fluidní vrstvy. Strhávání této vrstvy je velmi znatelné a suspenze tvořená shluky pevných částic a různě velkých dutin plynu vykazuje turbulentní pohyb. Dutiny plynu mají zpravidla různé tvary. Turbulentní (*Turbulent fluidization*), též nazývána tryskající, fluidace je znázorněna na Obrázku 16. [7]

3.5 Typy fluidních sušáren

Rozdělení fluidních sušáren lze provést:

Dle dávkování materiálu [28]

- Dávkové (Batch fluidized bed dryers)
- Semikontinuální (Semicontinuous fluidized bed dryers)
- Kontinuální (Well-mixed, Continuous fluidized bed dryers)

Dle druhu pomocné práce [28]

- Pulzující (Pulsating Fluidized bed dryers)
- Vibrační (Vibrated fluidized Bed dryers)
- S ponornými výměníky tepla (Fluidized bed dryers with immersed heat exchangers)
- Míchací/Vířivé (Agitated fluidized bed dryers/Swirl fluidizers)

Dle média [28]

- Plynové
- Kapalinové
- S inertními částicemi (Fluidized bed dryers of inert particles)
- S přehřátou parou (Superheated steam fluidized bed dryers)

Dle přívodu média [28]

- Se zásuvným tokem (Plug flow fluidized bed dryers)
- Vícestupňové a víceprocesové (Multistage and multiprocess fluidized bed dryers)
- Hybridní (Hybrid fluidized bed dryers)
- Tryskové sušárny (Jetting fluidized bed dryers)

Dle stavby sušárny [28]

- Sušárny s recirkulací média (Recirculation fluidized bed dryers)
- Sušárny s vnitřními přepážkami (Fluidized bed dryers with internal baffles)
- Sušárny s tepelným čerpadlem (Heat pump fluidized bed dryer)

Dle účelu sušárny [28]

- Vysoušecí (Spouted bed dryers)
- Mrazicí (Fluidized bed freeze dryer)

Výběr některých typů sušáren

Dávkové sušičky

Dávkové, nebo také vsádkové, sušičky se používají při malé kapacitě výroby (od 50 do 1000 kg/h). Tento způsob je vhodný pro postupné provádění procesů ve stejné nádobě, jako jsou například: míchání, sušení, granulace a chlazení. Teplota a průtok sušícího plynu jsou konstantní. Pro obtížně fluidizované materiály se do procesu přidávají mechanické metody míchání nebo vibrování. [28]

Semikontinuální sušičky

Semikontinuální sušičky mají sušící komoru složenou z řady dílčích součástí, ve kterých probíhají různé procesy. Vstupní sušený materiál je dávkován, kdy tyto dávky materiálu postupně procházejí jednotlivými komponenty sušící komory. Tento způsob zajišťuje plynulý a nepřetržitý provoz sušárny. Teplota a rychlost sušícího plynu se může v jednotlivých sekcích měnit. [28]

Kontinuální sušičky

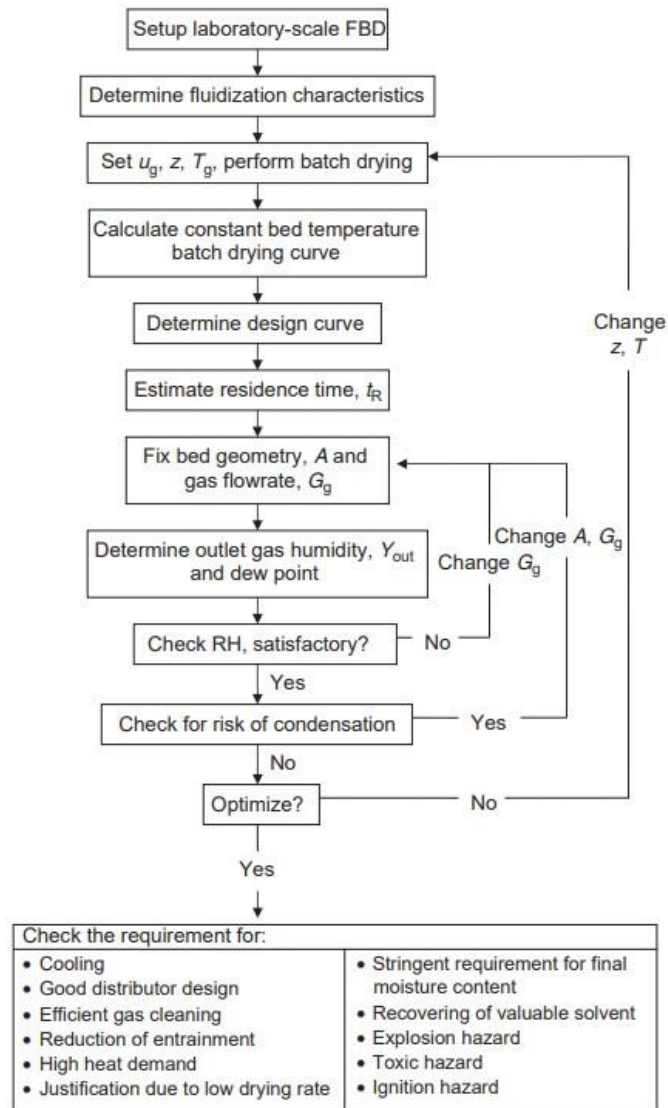
Kontinuální sušičky využívající dobře promíchanou suspenzi jsou jedny z nejpoužívanějších v průmyslu. Celá fluidní vrstva má konstantní teplotu v celém svém objemu. Nevýhodou je dlouhá doba zdržení částic. Oproti tomu je výhodou, že vstupní materiál je přiváděn do fluidního lože relativně suchých částic, což zlepšuje celkovou fluidovatelnost tohoto materiálu. Kontinuální sušička může být integrována do jiných typů sušiček, např. do sušiček s pístovým tokem, a tím zlepšovat jejich účinnost sušení. [28]

3.6 Optimalizace fluidní sušárny

Optimalizaci fluidní sušárny lze provést podle schématu převzatého ze zdroje [28], které je zobrazeno na Obrázku 17. Zkratkou *FBD* je myšlena fluidní sušárna („*Fluid Bed Dryer*“). V tomto schématu je u_g rychlost sušícího média. Tato rychlost je uvažována mezi prahovou rychlostí fluidace a mezní úletovou rychlostí. Veličina T_g značí teplotu sušícího média. Pod označením z je myšlena výška fluidní vrstvy.

Návrh či optimalizace by měla probíhat zadáním rozměrů sušárny, ze kterých se vypočtou fluidační charakteristiky a kinetika sušení, viz. kapitoly 3.1 a 3.2. Výstupem by

měla být požadovaná rychlost fluidačního média, která musí být omezena prahovou a úletovou rychlostí. Zvolí se teplota sušícího média na vstupu do sušárny a z . Dle schématu by měl následovat odhad sušící křivky a odhad doby zdržení materiálu v sušárně t_R . Výstupem by měla být úprava geometrie sušárny. Přednostně se jedná o průřez sušárny A a určení nebo odhad hmotnostního toku sušícího média G_g . Po dokončení těchto kroků následuje určení výstupní absolutní vlhkosti sušícího média Y_{out} . Následně probíhá kontrola ohřátí sušícího média RH na výstupu ze sušárny a kontrola kondenzace vlhkosti v sušícím médiu (relativní vlhkost musí být menší než 100 %). Možné úpravy zvolených nebo určených parametrů mohou probíhat dle schématu. [28]



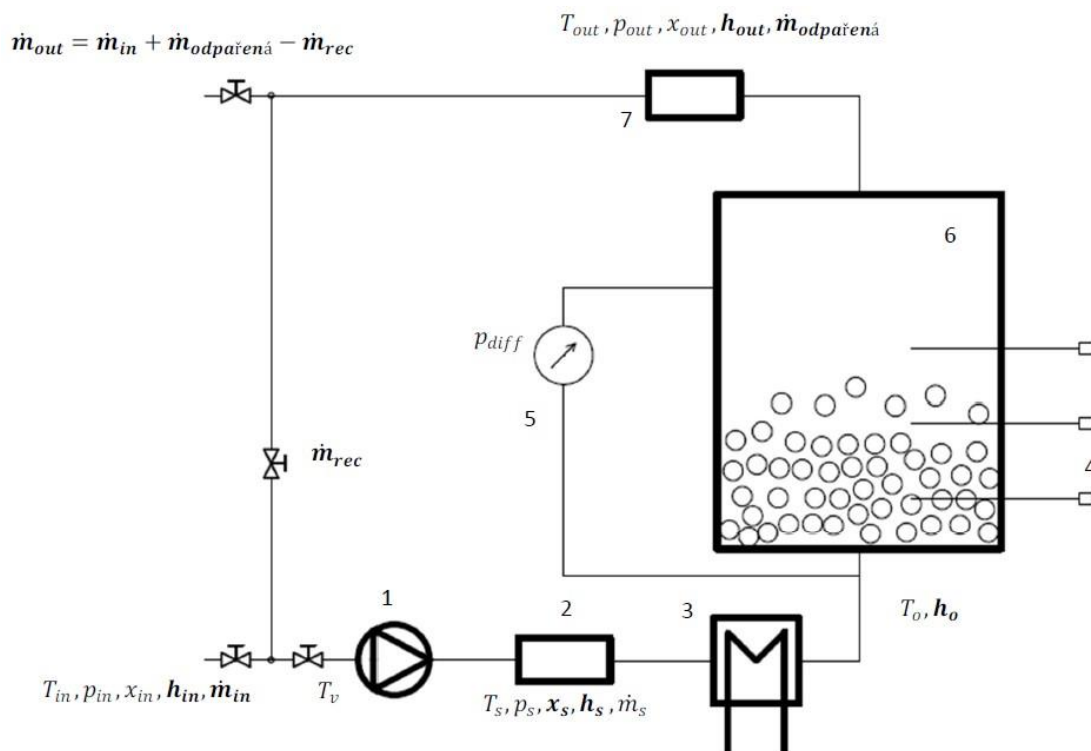
Obrázek 17: Schéma pro optimalizaci fluidní sušárny

4 Tvorba bilančního modelu fluidní sušárny

Pro návrh fluidní sušárny biomasy byl vytvořen výpočtový model. Postup tvorby návrhu byl následovný. První výpočty se týkají fluidních charakteristik. Ohledně statiky bylo nejprve uvažováno schéma pouze s tepelným výměníkem a fluidní sušárnou tak, jak je zobrazeno na Obrázku 21. Jakmile byla bilance schématu dokončena, byla připojena a uvažována regenerace vzduchu vycházejícího ze sušárny, jehož část byla přivedena před tepelný výměník, kde se mísí se vzduchem přivedeným z okolí. Takto upravené schéma je zobrazeno na Obrázku 22. Posledním krokem bylo zapojení regeneračního výměníku, který využívá teplo odchozího vzduchu ze systému pro předehřev vzduchu přicházejícího z okolí. Konečné schéma je zobrazeno na Obrázku 23. Na konec výpočtu byla zařazena kinetika sušení.

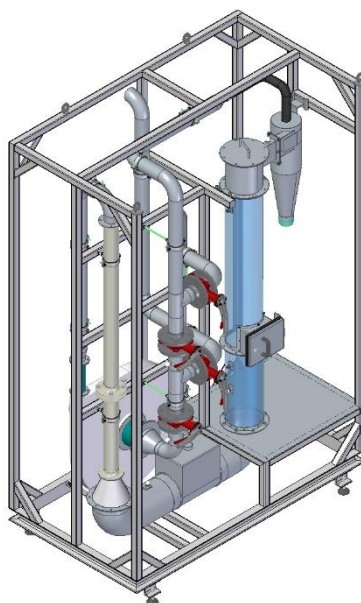
4.1 Zadání fluidní sušárny

Od vedoucího práce bylo zadáno základní schéma fluidní sušárny pro tvorbu bilančního modelu, které je zobrazeno na Obrázku 18. Na tomto schématu jsou hlavní komponenty označeny čísly 1 až 7. Legenda k těmto komponentám je následující: 1 – vysokotlaký ventilátor, 2 – měření průtoku, teploty a tlaku, 3 – ohřev vzduchu, 4 – měření tlaků vrstvy, 5 – diferenční měření tlaku, 6 – fluidní sušárna, 7 – měření vlhkosti, teploty a tlaku.



Obrázek 18: Zadané schéma fluidní sušárny

Na Obrázku 19 je zobrazena tato zadaná fluidní sušárna ve 3D zobrazení.



Obrázek 19: Zadaná fluidní sušárna 3D model

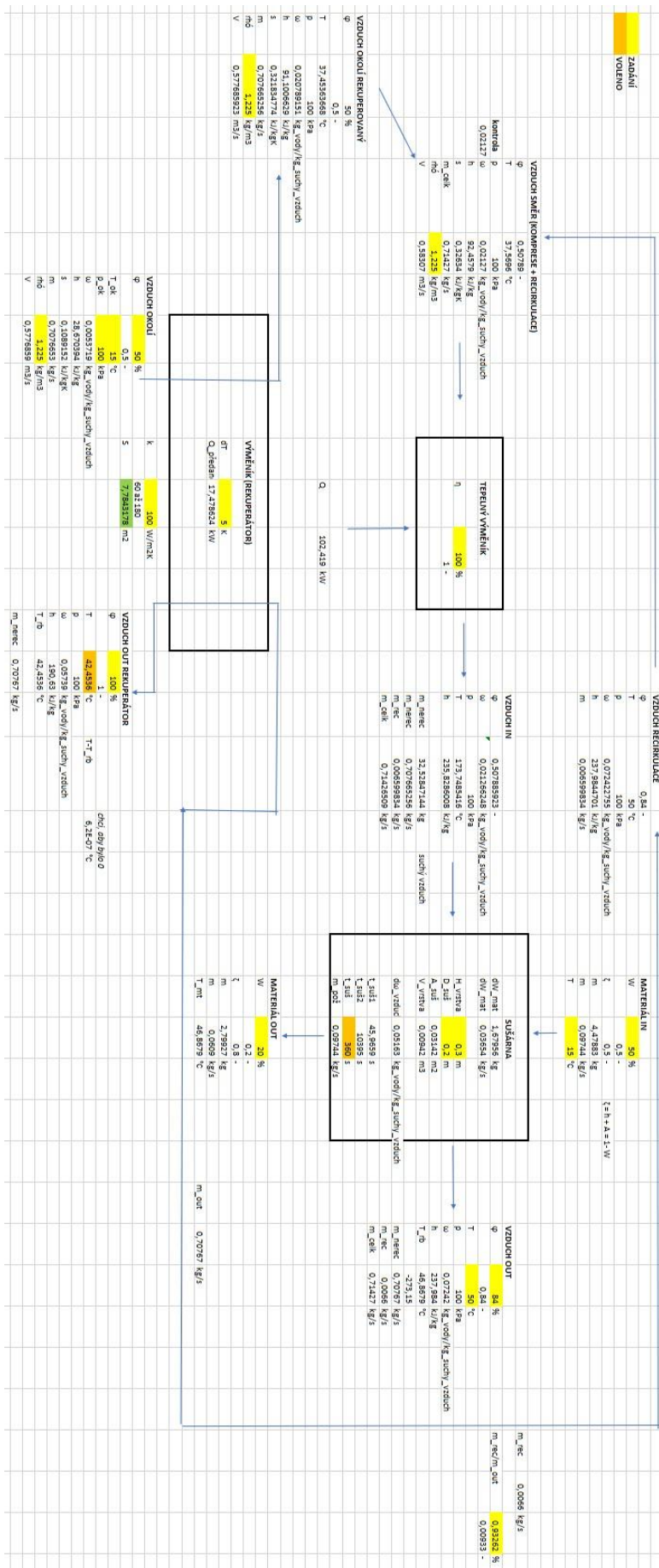
Charakteristické rozměry pro tuto fluidní sušárnu jsou uvažovány dle Tabulky 2.

Tabulka 2: Charakteristické rozměry pro fluidní sušárnu

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Průměr sušárny	$D_{suš}$	0,2	<i>m</i>
Výška fluidní vrstvy	H_{fv}	0,3	<i>m</i>

Výstupem bilančního modelu by měly být hodnoty hmotnostního toku vzduchu, teploty vzduchu na vstupu do sušárny a potřebného tepelného výkonu dodaného do zařízení. Tyto výstupní hodnoty by měly být optimalizovány podle teploty a relativní vlhkosti výstupního vzduchu ze sušárny a recirkulačního čísla. Výstupem by také měl být přínos rekuperace vzduchu na výstupu ze sušárny a základní parametry rekuperačního výměníku.

Pro výpočet bylo vytvořeno pracovní prostředí v programu MS Excel. Snímek obrazovky z tohoto prostředí je zobrazen na Obrázku 20. Postup tvorby výpočtového prostředí modelu jsou popsány níže v této kapitole. Hodnoty na snímku odpovídají hodnotám po optimalizaci, která je popsána v kapitole 6.1.



Obrázek 20: Snímek obrazovky z výpočtového prostředí

4.2 Okrajové podmínky pro výpočet

Sušícím médiem byl zvolen vzduch. Veličiny, které byly zařazeny do výpočtů, jsou uvedeny v Tabulce 3. Všechny byly uvažovány konstantní, třebaže jsou závislé na teplotě. Jejich hodnoty se v uvažovaném teplotním rozsahu mění minimálně a na celkovou bilanci mají zanedbatelný vliv. Odhadovaná chyba ve výpočtech vlivem uvažování konstantnosti hodnot je v řádu jednotek procent.

Tabulka 3: Okrajové podmínky pro vzduch

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JENDOTKA
Součinitel tepelné kapacity za konstantního tlaku	c_p	1,1	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
Hustota (pro $T = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$)	ρ	1,092	$kg \cdot m^{-3}$
Dynamická viskozita	μ	$1,95 \cdot 10^{-5}$	$Pa \cdot s$
Kinematická viskozita	ν	$1,79 \cdot 10^{-5}$	$m^2 \cdot s^{-1}$

Sušný materiál byl uvažován dřevní štěpkou z olšového dřeva. V Tabulce 4 jsou uvedeny zadané, nebo dohledané vlastnosti tohoto materiálu. Hustota olšového dřeva byla převzata ze zdroje [30] jako hodnota pro čerstvé dřevo. Ve zdroji nebylo uvedeno, jaké vlhkosti tato hodnota odpovídá. Pro orientační výsledek správnosti výpočtového modelu je tento zdroj dostatečný. Hodnota sypané hmotnosti byla převzata ze zdroje [25].

Tabulka 4: Okrajové podmínky pro sušený materiál

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JENDOTKA
Součinitel tepelné kapacity za konstantního tlaku	c_p	1,3	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
Rozměry částice		2 x 8 x 16	mm
Hustota	ρ	525	$kg \cdot m^{-3}$
Sypná hmotnost	ρ_s	294	$kg \cdot m^{-3}$

Po konzultaci s vedoucím práce byly zvoleny vstupní výpočtové hodnoty. Teplota a relativní vlhkost na výstupu ze sušárny jsou pro tvorbu modelu odhadnuté, všechny zbývající veličiny by měly zůstat po celou dobu totožné. Finální hodnoty budou výstupem z optimalizace fluidní sušárny. Všechny volené/zadané hodnoty v jednotlivých uzlech odpovídajících Obrázku 21 jsou uvedeny v Tabulce 5.

Tabulka 5: Okrajové podmínky v jednotlivých uzlech modelu

VELIČINA	SYMBOL	UZEL	HODNOTA	JEDNOTKA
Sušný materiál				
Vlhkost	W	A	50	%
		B	20	%
Teplota	T	A	15	$^\circ\text{C}$
Vzduch				
Relativní vlhkost	φ	1	50	%
		3	90	%
Teplota	T	1	15	$^\circ\text{C}$
		3	50	$^\circ\text{C}$
Tlak	p	1	100	kPa

Konstanta gravitačního zrychlení g byla pro výpočty uvažována $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

4.3 Fluidační charakteristiky

Pro určení rychlostí ve fluidní vrstvě bylo nutné nejprve vypočítat adekvátní průměr kruhové částice d_m z rozměrů zadaných částic. Aby bylo možné použít vztah v rovnici (3.2) pro výpočet sféricity, bylo nutné určit plochu zadané částice a plochu kulové částice se stejným objemem jako zadaná částice. Výpočetní postup je naznačen v rovnicích (4.1) až (4.5). Dolní index $zč$ značí zadanou částici a dolní index $kč$ kulovou částici. Rozměry částice pro výpočet plochy $S_{zč}$ a objemu $V_{zč}$ jedné částice byly čerpány z Tabulky 3.

$$S_{zč} = 2 \cdot ((2 \cdot 8) + (8 \cdot 16) + (16 \cdot 2)) = 352 \quad [mm^2] \quad (4.1)$$

$$V_{zč} = 2 \cdot 8 \cdot 16 = 256 \quad [mm^3] \quad (4.2)$$

$$V_{zč} = V_{kč} = \frac{\pi \cdot d_m^2}{4} \quad (4.3)$$

$$d_m = \sqrt{\frac{4 \cdot V_{kč}}{\pi}} = 7,9 \quad [mm] = 0,0079 \quad m \quad (4.4)$$

$$S_{kč} = \pi \cdot d_m^2 = 195 \quad [mm^2] \quad (4.5)$$

V rovnici (4.6) je zobrazen výpočet sféricity podle rovnice (3.2).

$$\sigma = \frac{S_{kč}}{S_{zč}} = 0,554 \quad [1] \quad (4.6)$$

V rovnici (4.7) je uveden výpočet Archimedova čísla Ar a v rovnici (4.8) výpočet Reynoldsova čísla platného pro prahovou rychlost fluidace Re_{pr} . Tyto dvě rovnice byly sestaveny pomocí rovnic (3.3) a (3.6). Dolní index mat značí sušený materiál a dolní index vz sušící vzduch.

$$Ar = \frac{d_m^2 \cdot \rho_{vz} \cdot (\rho_{mat} - \rho_{vz}) \cdot g}{\mu^2} = 7\,216\,370 \quad [1] \quad (4.7)$$

$$Re_{pr} = \sqrt{33,7^2 + 0,0408 \cdot Ar} - 33,7 = 510 \quad [1] \quad (4.8)$$

Pomocí podobnostních čísel platných pro prahovou rychlost fluidace byla vypočtena mezerovitost ε . Výpočet je zobrazen v rovnici (4.9). Vztah byl sestaven podle rovnice (3.7).

$$\varepsilon_{pr} = Ar^{-0,21} \cdot (18 \cdot Re_{pr} + 0,36 \cdot Re_{pr}^2)^{0,21} = 0,41 [1] \quad (4.9)$$

Z hodnoty Re_{pr} byla následně vypočtena prahová rychlost u_{pr} , která byla vyjádřena z rovnice (3.4). Výsledný vztah je uveden v rovnici (4.10).

$$u_{pr} = \frac{Re_{pr} \cdot \mu}{d_m \cdot \rho_{vz}} = 1,16 [m \cdot s^{-1}] \quad (4.10)$$

Hodnota rychlosti ve fluidní vrstvě u_{fv} byla vypočtena jako součin koeficientu k , který byl zvolen 2 (zdroj [28] uvádí doporučenou volbu 2 až 3), a prahové rychlosti. Vzorec pro výpočet rychlosti ve fluidní vrstvě je uveden v rovnici (4.11).

$$u_{fv} = u_{pr} \cdot k = 2,31 [m \cdot s^{-1}] \quad (4.11)$$

Pomocí již známé rychlosti ve fluidní vrstvě bylo vypočítáno Reynoldsovo číslo platné pro tuto rychlost Re_{fv} a následně přepočítána mezerovitost ε_{fv} . Vztahy pro výpočet jsou uvedeny v rovnicích (4.12) a (4.13). Výpočet Reynoldsova čísla byl proveden dle rovnice (3.4).

$$Re_{fv} = \frac{d_m \cdot u_{fv} \cdot \rho_{vz}}{\mu} = 1010 [1] \quad (4.12)$$

$$\varepsilon_{fv} = Ar^{-0,21} \cdot (18 \cdot Re_{fv} + 0,36 \cdot Re_{fv}^2)^{0,21} = 0,54 [1] \quad (4.13)$$

Pro výpočet úletové rychlosti u_{ul} byl sestaven vzorec uvedený v rovnici (4.15), který byl převzat z rovnice (3.11). Výpočet odporového součinitele C_D byl proveden pomocí vztahu uvedeném v rovnici (3.10) a jeho výsledná podoba je znázorněna v rovnici (4.14).

$$C_D = \frac{24}{Re_{pr}} \cdot (1 + 8,1716 \cdot e^{-4,0655 \cdot \phi} \cdot Re_{pr}^{0,0964 + 0,5565 \cdot \phi}) + \frac{73,69 \cdot e^{-5,0748 \cdot \phi} \cdot Re_{pr}}{Re_{pr} + 5,378 \cdot e^{6,2122 \cdot \phi}} \quad (4.14)$$

$$C_D = 3,89 [1]$$

$$u_{ul} = \left(\frac{4 \cdot d_m \cdot (\rho_{mat} - \rho_{vz}) \cdot g}{3 \cdot \rho_{vz} \cdot C_D} \right)^{0,5} = 3,57 [m \cdot s^{-1}] \quad (4.15)$$

Kontrola provedená v rovnici (4.16) dokazuje, že vypočtená hodnota ve fluidní vrstvě je správně vypočtena. Její hodnota je větší, než prahová rychlost fluidace u_{pr} a zároveň menší než úletová rychlost fluidace u_{ul} .

$$u_{pr} < u_{fv} < u_{ul} \quad (4.16)$$

$$1,16 < 2,31 < 3,57$$

Následně byla určena tlaková ztráta fluidní vrstvy, přičemž byl použit vztah z rovnice (3.20). Výpočet byl proveden tak, jak je uvedeno v rovnici (4.17).

$$\Delta p_{fv} = \frac{150 \cdot H_{fv} \cdot (1 - \varepsilon_{fv})^2 \cdot \mu}{\varepsilon^2 \cdot \sigma^2 \cdot d_m^2} \cdot u + \frac{1,75 \cdot H_{fv} \cdot (1 - \varepsilon_{fv}) \cdot \rho_{vz}}{\varepsilon^2 \cdot \sigma \cdot d_m} \cdot u^2 \quad (4.17)$$

$$\Delta p_{fv} = 1166 \text{ [Pa]}$$

Pomocí rovnic (3.12) a (3.13) byly vypočteny požadované hmotnostní toky sušícího vzduchu sušárnou. V rovnici (4.18) je uveden výpočet průřezu sušárny ze zadaných hodnot. Výpočet požadovaného objemového a hmotnostního toku je znázorněn v rovnicích (4.19) a (4.20).

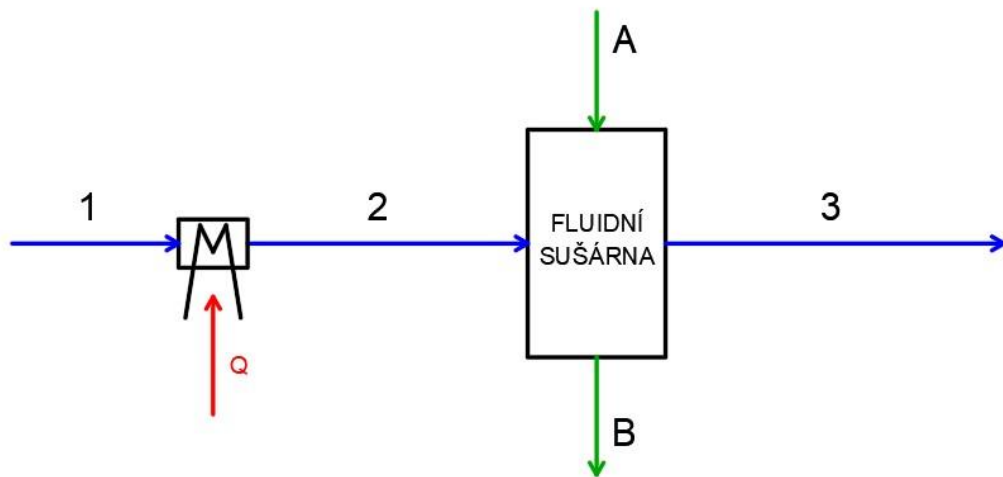
$$A_{suš} = \frac{\pi \cdot D_{suš}^2}{4} = 0,0314 \text{ [m}^2\text{]} \quad (4.18)$$

$$m_{vz,pož} = u_{fv} \cdot A_{suš} = 0,073 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{]} \quad (4.19)$$

$$m_{vz,pož} = u_{fv} \cdot A_{suš} \cdot \rho_{vz} = 0,079 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}\text{]} \quad (4.20)$$

4.4 Statika bez recirkulace a bez rekuperace

Na Obrázku 18 je zobrazeno schéma systému bez uvažování recirkulace a rekuperace odchozího vzduchu ze sušárny. Pro možné revidování výpočtů byl zvolen pro výpočet základní varianty hmotnostní tok sušeného materiálu na vstupu do sušárny na $1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$.



Obrázek 21: Schéma systému bez recirkulace a rekuperace vzduchu

Dle rovnice (2.1) bylo vypočteno procentuální množství sušiny materiálu v uzlech A i B. Výpočet je uveden v rovnicích (4.21) a (4.22). Použitím rovnice (2.4) a vyjádřením hmotnostního toku odchozího paliva ze sušárny byl získán vztah uvedený v rovnici (4.23).

$$\zeta_A = 1 - W_A = 1 - 0,5 = 0,5 \quad [1] \quad (4.21)$$

$$\zeta_B = 1 - W_B = 1 - 0,2 = 0,8 \quad [1] \quad (4.22)$$

$$M_B = \frac{M_A \cdot \zeta_A}{\zeta_B} = 0,625 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4.23)$$

Rovnice (4.24) zobrazuje výpočet odsušeného množství vody z materiálu za jednotku času.

$$\Delta W_{mat} = M_A - M_B = 0,375 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4.24)$$

V žádné z variant nebyly uvažovány tlakové ztráty systému, a proto lze konstatovat, že zadaný tlak ve větvi 1 je totožný i ve větvích 2 a 3. Ze zadaných relativních vlhkostí vzduchu a teplot v uzlech 1 a 3 byly pomocí doplňku *Coolprop* do *MS Excel* zjištěny absolutní vlhkosti v těchto uzlech. Byla užita funkce pro suchý vzduch =*HA-PropsSI("W";T;T1;P;P1;R;R1)*. Obdobným způsobem byly zjištěny hodnoty entalpií v těchto uzlech. Výsledné hodnoty jsou zobrazeny v Tabulce 6.

Tabulka 6: Výsledné hodnoty abs. vlhkosti a entalpie vzduchu v uzlech 1 a 3

VĚTEV	$\omega \text{ [kg}_{vody} \cdot \text{kg}_{sv}^{-1}]$	$h \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
1	0,0054	28,7
3	0,0783	253

Hodnota absolutní vlhkosti v uzlu 1 odpovídá uzlu 2, protože přívod tepla nijak nezmění vlhkosti vzduchu. Z těchto zjištěných hodnot byl dle rovnice (4.25) vypočten rozdíl absolutních vlhkostí vzduchu.

$$\Delta \omega = \omega_3 - \omega_2 = 0,0729 \text{ [kg}_{vody} \cdot \text{kg}_{sv}^{-1}] \quad (4.25)$$

Hmotnostní tok sušícího vzduchu byl vypočten jako podíl odsušeného množství vody a rozdílu absolutních vlhkostí. Veškeré hmotnostní toky vzduchu jsou vztaženy na suchý vzduch. Vztah pro výpočet je uveden v rovnici (4.26).

$$M_1 = M_2 = M_3 = \frac{\Delta W_{mat}}{\Delta \omega} = 5,146 \text{ [kg}_{sv} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4.26)$$

Rovnice (4.27) popisuje výpočet pro určení potřebného množství tepla pro ohřev materiálu na teplotu mokrého teploměru T_{mt} (Q_{mat}), která byla zjištěna pomocí *Coolpropu* na 48,08 °C. T_{mt} je nižší než zvolená teplota T_3 , tím pádem je zároveň nižší než T_{rb} , což dokazuje, že model dává fyzikálně smysl a nebude docházet ke kondenzaci. V rovnici (4.28) je uveden výpočtový vztah pro výpočet potřebného množství tepla pro vypaření požadovaného množství vody (Q_{vyp}). Tato hodnota byla získána jako součin odsušeného množství vody za 1 s a latentního množství tepla $\Delta h = 2257,44 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ zjištěného pomocí *Coolpropu* pro vodu při tlaku p_1 jako rozdíl entalpií na mezních křivkách (kvalita 0 odpovídá nasycené kapalině, kvalita 1 nasycené páře). Zápis funkce v Excelu byl proveden následujícím takto: =*PropsSI("H";"P";P1;"Q";0;"water")*. Množství tepla využitě k ohřevu sušícího vzduchu z teploty T_1 na teplotu T_3 (Q_{vz}) je vypočteno v rovnici (4.29). Rovnice (4.30) udává výpočet pro přehřátí vodní páry z teploty T_{mt} na T_3 (Q_{preh}). Měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku vody byla uvažována $4,2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Užitím rovnice (2.9) byla získána rovnice (4.31), která udává celkové potřebné množství tepla.

$$Q_{mat} = M_A \cdot c_{p,mat} \cdot (T_{mt} - T_A) = 43 \text{ [kW]} \quad (4.27)$$

$$Q_{vyp} = \Delta W_{mat} \cdot \Delta h = 846,5 \text{ [kW]} \quad (4.28)$$

$$Q_{vz} = M_1 \cdot c_{p,vz} \cdot (T_3 - T_1) = 198,1 \text{ [kW]} \quad (4.29)$$

$$Q_{přeh} = \Delta W_{mat} \cdot c_{p,voda} \cdot (T_3 - T_{mt}) = 3 \text{ [kW]} \quad (4.30)$$

$$Q_{celk} = Q_{mat} + Q_{vyp} + Q_{vz} + Q_{přeh} = 1098,7 \text{ [kW]} \quad (4.31)$$

Dalším krokem bylo určení entalpie v uzlu 2, která byla vypočtena ze známého tepelného výkonu výměníku pomocí energetické bilance dle rovnice (4.32). Vyjádřením jediné neznámé veličiny v této rovnici vznikl vztah v rovnici (4.33).

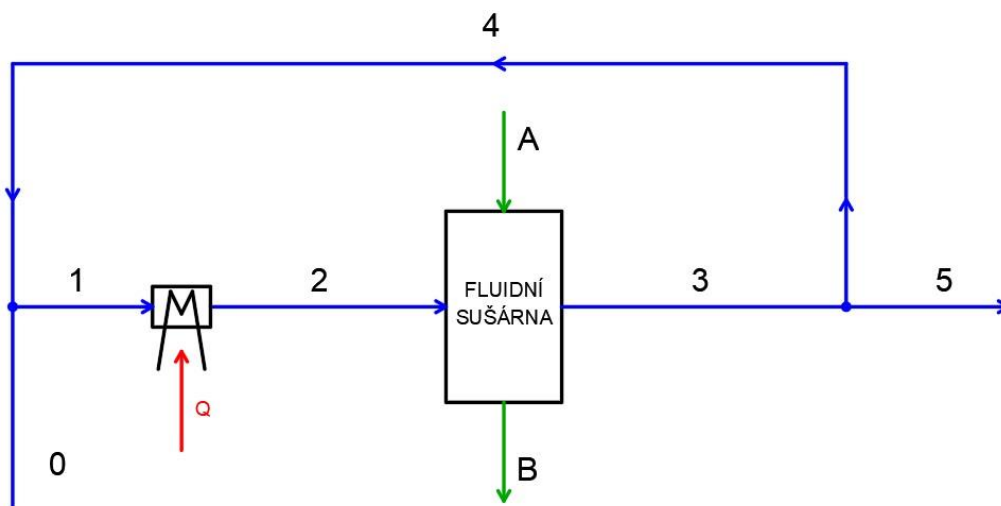
$$Q_{celk} = M_1 \cdot (h_2 - h_1) \quad (4.32)$$

$$h_2 = \frac{Q_{celk}}{M_1} + h_1 = 240,6 \text{ [kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (4.33)$$

Použitím doplňku *Coolprop* byla zjištěna teplota T_2 , která vyšla 221,8 °C. Zápis funkce byl proveden obdobně jako u zjišťování latentního tepla vody. Teplota T_2 byla vyhodnocena jako příliš vysoká a mohla by překročit zápalnou teplotu sušeného materiálu. Z tohoto důvodu bylo dalším krokem zavedení recirkulace vzduchu.

4.5 Statika s recirkulací bez rekuperace

Na Obrázku 22 je zobrazeno schéma systému s uvažovanou recirkulací odchozího vzduchu ze sušárny, který je zaveden před tepelný výměník. Po dokončení této fáze výpočtu byl řešen výpočet kinetiky fluidace. Větev 1 u Obrázku 16 nyní odpovídá uzlu 0. Hodnoty stavových veličin ve větvi 3 jsou totožné i ve větvích 4 a 5. Liší se zde pouze hmotnostní tok sušícího vzduchu ve větvích 1, 2 a 3.



Obrázek 22: Schéma systému s recirkulací bez rekuperace

Recirkulace byla zavedena z důvodu snížení teploty T_2 , kvůli bezpečnosti sušení, která by mohla být narušena vznícením materiálu ve fluidní sušárně. Změna parametrů

nastává i u relativní a absolutní vlhkosti vzduchu a entalpie ve větvi 1. Všechny parametry, u nichž proběhla změna jsou přímo závislé na množství recirkulovaného vzduchu. Zavedením recirkulace se nijak nezmění následující hodnoty: množství celkového potřebného tepla Q a hmotnostní tok M_0 (odpovídá M_I z kapitoly 4.3). Množství recirkulovaného množství vzduchu je vypočítáváno procentuálním recirkulačním parametrem R [1] z hodnoty M_0 . Výpočet hmotnostního toku ve větvi 4 je zobrazen v rovnici (4.34). Rovnice (4.35) udává celkový hmotnostní průtok suchého vzduchu větvemi 1, 2 a 3. M_5 je roven hodnotě M_0 .

$$M_4 = M_0 \cdot R \quad [kg_{sv} \cdot s^{-1}] \quad (4.34)$$

$$M_1 = M_2 = M_3 = M_4 + M_0 \quad [kg_{sv} \cdot s^{-1}] \quad (4.35)$$

Rovnice (4.36) až (4.38) popisují výpočet parametrů ve větvi 1. Výpočet byl vytvořen na bázi míchání dvou proudů vzduchu do jednoho, konkrétně míchání větve 0 a 4 do větve 1. Veškeré hodnoty ve větvi 4 jsou totožné jako ve větvi 3, kromě hmotnostního toku sušícího média. Do rovnice (4.36) udávající výslednou teplotu je nutno dosazovat hodnoty v Kelvinech a následně je opět přepočíst na stupně Celsia.

$$T_1 = \frac{M_0 \cdot T_0 + M_4 \cdot T_4}{M_1} = \frac{M_0 \cdot T_0 + M_4 \cdot T_4}{M_4 + M_1} \quad (4.36)$$

$$\omega_1 = \frac{M_0 \cdot \omega_0 + M_4 \cdot \omega_4}{M_1} = \frac{M_0 \cdot \omega_0 + M_4 \cdot \omega_4}{M_4 + M_1} \quad (4.37)$$

$$h_1 = \frac{M_0 \cdot h_0 + M_4 \cdot T_4}{M_1} = \frac{M_0 \cdot h_0 + M_4 \cdot h_4}{M_4 + M_1} \quad (4.38)$$

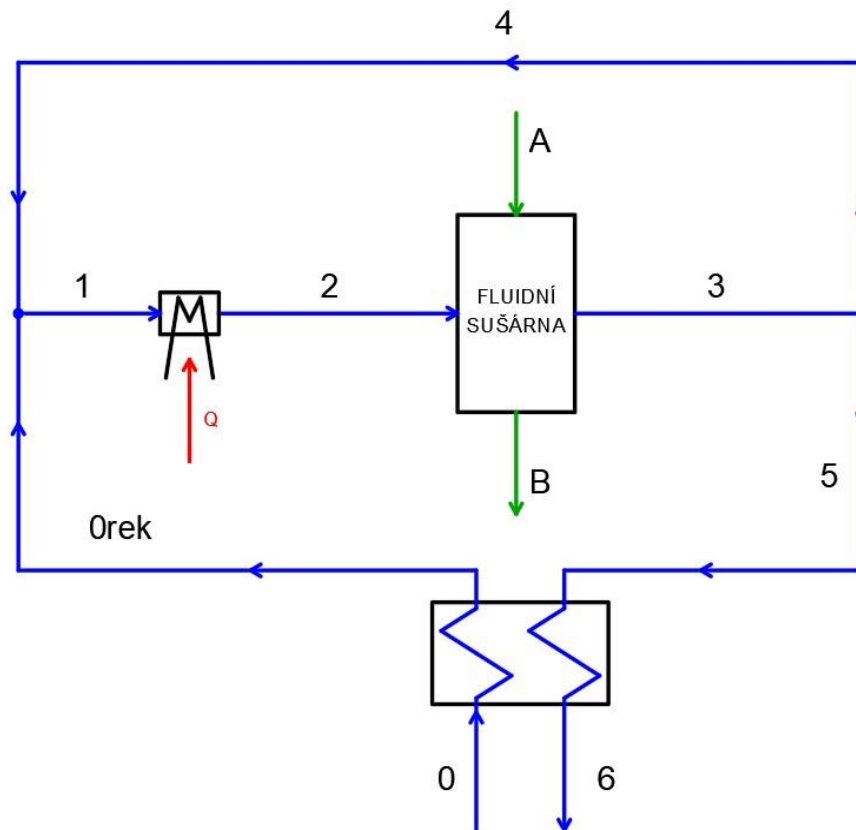
Relativní vlhkost φ_1 byla zjištěna pomocí doplňku *Coolprop*. Tato relativní vlhkost udává maximální možnou přípustnou hodnotu recirkulačního parametru R . Vycházelo se z podmínky $\varphi_1 < 0,995$, aby bylo zajištěno, že vodní pára obsažená ve vzduchu nebude kondenzovat. Jakmile by hodnota relativní vlhkosti dosáhla 100 %, bylo by zároveň dosaženo teploty rosného bodu. Omezující hodnota 99,5 % byla zvolena v důsledku možných nepřesností ve výpočtu, kde by měla rezerva 0,5 % být dostačující. Maximální možné hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 7. Hodnota R_{max} byla zjištěna pomocí funkce *řešitel* (v anglických verzích *solver*). Aby bylo možné navýšit recirkulační parametr, bylo nutné zavést rekuperaci odchozího vzduchu pro předeřev vzduchu vstupujícího do systému z okolí.

Tabulka 7: Hodnoty větve 1 při R_{max}

VELIČINA	HODNOTA	JEDNOTKA
T_1	19,2	$^{\circ}\text{C}$
ω_1	0,0142	$\text{kg}_{\text{vody}} \cdot \text{kg}_{\text{sv}}^{-1}$
φ_1	0,995	1
h_1	55,8	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
R	13,7	% z M_0

4.6 Statika s recirkulací a s rekuperací

Na Obrázku 23 je zobrazeno schéma systému s uvažovanou recirkulací i rekuperací odchozího vzduchu ze sušárny. Byl přidán rekuperační výměník, který je určen pro předehřev vstupujícího vzduchu do systému. Tento krok umožňuje nastavení většího recirkulačního koeficientu R, než tomu bylo v předchozím případě. Tím se výrazně zvýšila možná regulace celkového průtoku sušárnou. Byly přidány větve 0ek a 6, což jsou výstupy z rekuperačního výměníku, pro který byl zvolen minimální teplotní rozdíl 5 K. Princip předávání tepla mezi větvemi 0 a 5 je řešen ochlazením vzduchu na teplotu rosného bodu T_{rb} a následné další ochlazení, při kterém bude docházet ke kondenzaci vodní páry ve vzduchu. Rekuperační výměník je řešen v protiproudém režimu.



Obrázek 23: Schéma systému s recirkulací a s rekuperací

Hodnoty teplot a entalpií vzduchu v uzlech 0rek a 6 jsou zobrazeny v Tabulce 8. Tlak a vlhkosti proudů se se změnou teploty nemění.

Tabulka 8: Teploty a entalpie ve větvích 0rek a 6

VELIČINA	HODNOTA	JEDNOTKA
T_{0rek}	37,5	$^{\circ}C$
h_{0rek}	91,1	$kJ \cdot kg^{-1}$
T_6	42,5	$^{\circ}C$
h_6	190,6	$kJ \cdot kg^{-1}$

Obrázek 24 znázorňuje Q-T diagram vytvořený pro rekuperační výměník tepla. Z průběhu topného vzduchu lze přesně určit bod, kde se vzduch z teploty T_5 ochladí na teplotu sytosti ($\varphi = 100\%$). Až do tohoto bodu je průběh křivky rovnoběžný s křivkou ohřivaného vzduchu. Tento fakt je způsoben kvůli uvažování stejných tepelných kapacit a je zde totožný hmotnostní tok vzduchu, jelikož v celém systému nejsou uvažovány a započítávány netěsnosti. Po dosažení tohoto bodu se průběh zmírní a klesá mnohem pomaleji, než tomu bylo doposud. Teplota ochlazovaného vzduchu odpovídá tedy teplotě rosného bodu pro každý aktuální stav kondenzace.



Obrázek 24: QT diagram rekuperátoru

Výkon rekuperačního výměníku Q_{rek} byl spočítán pomocí rovnice pro určení tepelného výkonu tak, jak je uvedeno ve vztahu (4.39).

$$Q_{rek} = M_0 \cdot c_{p,vz} \cdot (T_{0,rek} - T_0) = 4,8 \text{ [kW]} \quad (4.39)$$

Celkový potřebný teplotní výkon byl snížen o výkon rekuperačního výměníku. Nyní je nutné do systému dodávat 29 kW.

Recirkulační parametr R lze po přidání rekuperátoru nastavit teoreticky téměř neo-
mezeně. Omezujícím parametrem je nyní teplota na vstupu do sušárny. Její hodnota musí
být dostatečně vysoká pro zajištění odvodu vlhkosti z materiálu. Lze konstatovat,
že se tímto opatřením několikanásobně zvýšila regulační schopnost systému pomocí re-
cirkulace odchozího vzduchu.

Potřebnou teplosměnnou plochu rekuperátoru S_{rek} lze pro orientaci vypočítat jedno-
duchým výpočtem zobrazeným v rovnici (4.40). Hodnota koeficientu přenosu tepla
 α_{rek} byla převzata ze zdroje [31] a určena na $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Tato hodnota je platná
pro deskový výměník typu vzduch – vzduch.

$$S_{rek} = \frac{Q_{rek}}{\alpha_{rek} \cdot \Delta T} \quad [\text{m}^2] \quad (4.40)$$

4.7 Kinetika

Celkový hmotnostní tok ve větvích 1, 2 a 3 musí odpovídat hodnotě $m_{vz,pož}$. Toho
se docílí pomocí recirkulačního koeficientu R, který reguluje hmotnostní průtoky ve vět-
vích 1, 2 a 3. K tomuto účelu lze použít funkci *řešitel*.

Následně byl výpočet modifikován pro vsázkové sušení. Pro tyto účely bylo nutné
vypočítat objem fluidní vrstvy V_{fv} , jakou součin průřezu sušárny a výšky fluidní vrstvy H_{fv} .
Výpočet je uveden v rovnici (4.41).

$$V_{fv} = A_{suš} \cdot H_{fv} = 0,0094 \quad [\text{m}^3] \quad (4.41)$$

Ze známé hodnoty objemu fluidní vrstvy lze spočítat objem, který zabere materiál
pomocí mezerovitosti ε tak, jak je uvedeno v rovnici (4.42).

$$V_{mat} = V_{fv} \cdot \varepsilon_{fv} = 0,0051 \quad [\text{m}^3] \quad (4.42)$$

Hmotnost vsázky lze nyní určit jako součin objemu fluidní vrstvy, kterou zabírá
sušený materiál a hustoty materiálu. Tento krok je uveden v rovnici (4.43). Ze známé
definice mezerovitosti, která je uvedena v rovnici (3.9), lze získat alternativní výpočet
pomocí sypané hmotnosti ρ_s tak, jak je uvedeno v rovnici (4.44). Tento výpočet byl prove-
den pro porovnání obou variant výpočtů hmotnosti sušeného materiálu. Rozdíl
ve výsledcích je zanedbatelný a je způsoben užitím tabulkových hodnot. Pro další výpo-
čty byl uvažován výsledek z rovnice (4.43).

$$m_{mat} = V_{sm} \cdot \rho_{sm} = V_{fv} \cdot \varepsilon_{fv} \cdot \rho_{mat} = 2,69 \quad [\text{kg}] \quad (4.43)$$

$$m_{mat} = V_{fv} \cdot \rho_s = 2,77 \quad [\text{kg}] \quad (4.44)$$

Pro tuto hmotnost vsázky byly přepočteny tepelné nároky pro ohřev materiálu
na teplotu mokrého teploměru, odpaření vody z materiálu a přehřátí vypařené páry na vý-
stupní teplotu T_5 . Výpočty pro určení potřebného množství tepla jsou uvedeny v rovnicích
(4.45) až (4.47). V rovnici (4.48) je uveden vztah pro určené celkové potřebné množ-
ství tepla, který je uvažován jako součet tepel z rovnic (4.45) až (4.47). Horní index

V určuje, že se jedná o veličiny vztažené k vsázkovému dávkování materiálu. Hodnota ΔW_{mat} byla přepočtena na 1,007 kg.

$$Q_{mat}^V = M_{sm} \cdot c_{p,mat} \cdot (T_{mt} - T_A) = 115,5 \text{ [kJ]} \quad (4.45)$$

$$Q_{vyp}^V = \Delta W_{mat} \cdot \Delta h = 2428,8 \text{ [kJ]} \quad (4.46)$$

$$Q_{přeh}^V = \Delta W_{mat} \cdot c_{p,voda} \cdot (T_3 - T_{mt}) = 8,1 \text{ [kJ]} \quad (4.47)$$

$$Q^V = Q_{mat}^V + Q_{vyp}^V + Q_{přeh}^V = 2552,4 \text{ [kJ]} \quad (4.48)$$

Rovnice (4.49) až (4.52) popisují postup výpočtu pro určení kontaktní plochy všech kusů materiálu K ve fluidní vrstvě S_{mat} .

$$V_{mat,1ks} = 2 \cdot 8 \cdot 16 \cdot 10^{-9} = 256 \cdot 10^{-9} \text{ [m}^3\text{]} \quad (4.49)$$

$$K = \frac{V_{mat}}{V_{mat,1ks}} = 19\,979 \text{ [ks]} \quad (4.50)$$

$$S_{mat,1ks} = S_{zč} \cdot 10^{-6} = 352 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2\text{]} \quad (4.51)$$

$$S_{mat} = S_{mat,1ks} \cdot K = 7,03 \text{ [m}^2\text{]} \quad (4.52)$$

Pro určení celkového času potřebného pro sušení je nutné sušící proces rozdělit na tři části, v nichž má každá fáze rozdílné ΔT_{ln} . První fáze spočívá v ohřevu materiálu na teplotu mokrého teploměru, druhá fáze je odpařovací, v níž materiál předává vlhkost sušicímu vzduchu a třetí fáze je přehřátí páry z teploty mokrého teploměru na výstupní teplotu vzduchu. Tato třetí fáze byla ve výpočtech zohledněna pouze potřebným teplem pro tuto fázi. Dle zdroje [28] byl vypočten součinitel prostupu tepla k tak, jak je znázorněno v rovnicích (4.53) až (4.55). Výpočet Prandtlova čísla byl převzat z rovnice (3.15) a výpočet Nusseltova čísla byl proveden dle rovnice (3.17). Tato hodnota je platná pouze pro volnou vodu, tzn vodu na povrchu částic. Pro vázanou vodu ve struktuře materiálu se tato hodnota bude měnit se vzdáleností od středu částice a s dobou sušení. Pro výpočtové účely byla hodnota Nusseltova čísla prohlášena za konstantní po celou dobu sušení, což idealizuje výpočet. Tepelná vodivost λ byla určena jako $0,0314 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ jakožto tabulková hodnota ze zdroje [32] pro teplotu vzduchu $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Vypočtená hodnota součinitele prostupu tepla dle rovnice (3.19) byla uvažována totožná pro fáze ohřevu materiálu i vypařování vody z materiálu. Jednotlivé fáze byly označeny indexací odpovídající každé z nich: fáze ohřevu materiálu – index O a fáze vypařování – index V .

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda} = 0,683 \text{ [1]} \quad (4.53) \text{ [29]}$$

$$Nu = 1,01 \cdot Re^{0,48} \cdot Pr^{0,33} = 24,76 \quad [1] \quad (4.54)$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{d_m} Nu = 98,7 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (4.55) [28]$$

Pro fázi ohřevu materiálu byl vypočten logaritmický teplotní spád dle rovnice (4.56). Tato hodnota společně s celkovou plochou částic materiálu a součinitelem prostupu tepla udává tepelný výkon pro fázi ohřevu Q_O^V vypočtený v rovnici (4.57). V rovnici (4.58) je zobrazen výpočet potřebného času pro tuto fázi. Čas lze získat jako podíl hodnot celkového potřebného tepla pro ohřev materiálu a tepelného výkonu v této fázi.

$$\Delta T_{ln,O} = \frac{(T_2 - T_A) - (T_3 - T_B)}{\ln \frac{T_2 - T_A}{T_3 - T_B}} = 136,2 \quad [^{\circ}C] \quad (4.56)$$

$$Q_O^V = k \cdot S_{mat} \cdot \Delta T_{ln,O} = 104 \quad [kW] \quad (4.57)$$

$$t_O = \frac{Q_{mat}^V}{Q_O^V} = 2,4 \quad [s] \quad (4.58)$$

Pro fázi vypařování vody se změní výpočet teplotního logaritmického spádu tak, jak je znázorněno v rovnici (4.59). Dle rovnice (4.60) byl získán potřebný tepelný výkon pro fázi vypařování Q_V^V . Sušící čas potřebný pro tuto fázi byl vypočten v rovnici (4.61) a celkový čas pro obě fáze v rovnici (4.62) jako součet časů obou fází.

$$\Delta T_{ln,V} = \frac{(T_2 - T_A) - (T_3 - T_B)}{\ln \frac{T_2 - T_A}{T_3 - T_B}} = 32,7 \quad [^{\circ}C] \quad (4.59)$$

$$Q_V^V = k \cdot S_{mat} \cdot \Delta T_{ln,V} = 26,5 \quad [kW] \quad (4.60)$$

$$t_V = \frac{Q_{vyp}^V}{Q_V^V} = 114 \quad [s] \quad (4.61)$$

$$t_{suš,1} = t_V + t_O = 116,4 \quad [s] \quad (4.62)$$

Druhý způsob výpočtu byl proveden dle měrné odpařivosti, které byla zvolena na $100 \text{ kg}_{vody} \cdot h^{-1} \cdot m^{-3}$. Jelikož se jedná o přestup tepla ve fázi vypařování, výpočet je proveden pouze pro druhou fázi. Postup výpočtu je uveden v rovnicích (4.63) až (4.65), které vycházejí z rovnice (3.19).

$$t_{suš,2} = \frac{\Delta W_{mat}}{c_{od} \cdot V_{mat}} = 7088 [s] = 1,97 [hod] \quad (4.63)$$

$$Q_{vyp} = \frac{Q_{vyp}^V}{t_{suš,2}} = 0,34 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (4.64)$$

$$\alpha = \frac{Q_{vyp}}{S_{mat} \cdot \Delta T_{ln,v}} = 1,6 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (4.65)$$

Pro orientační výpočet bylo dále uvažováno s výpočtem času sušení podle prvního uvažovaného způsobu – rovnice (4.52) až (4.61). Pro konkrétnější praktický výpočet nutno volit čas sušení mezi $t_{suš,1}$ a $t_{suš,2}$.

Ze znalosti času sušení a hmotnosti vsázky lze určit teoretický hmotnostní tok materiálu na vstupu do sušárny M_A^{teor} podle rovnice (4.66). Tato hodnota byla následně dosazena za hodnotu M_A .

$$M_A^{teor} = \frac{M_{sm}}{t_{suš,1}} = 0,028 [kg \cdot s^{-1}] \quad (4.66)$$

Po této aktualizaci zadání hmotnostního množství sušeného materiálu se automaticky přepočtl celý model. Pro názornost byly vybrány hmotnostní toky a potřebná tepla, které jsou shromážděny v Tabulce 9. Všechny zde zmíněné hodnoty lze prohlásit za iterační hodnoty prvního stupně.

Tabulka 9: Změněné hodnoty při vsázkovém režimu

VELIČINA	HODNOTA	JEDNOTKA
M_A^I	0,028	$kg \cdot s^{-1}$
M_B^I	0,017	$kg \cdot s^{-1}$
M_0^I	0,182	$kg \cdot s^{-1}$
ΔW_{mat}	1,01	$kg \cdot s^{-1}$
Q_{mat}^I	1,2	kW
Q_{vyp}^I	25,2	kW
Q_{vz}^I	2,5	kW
$Q_{přeh}^I$	0,1	kW
Q_{celk}^I	32,5	kW

5 Experiment

5.1 Popis experimentálního zařízení

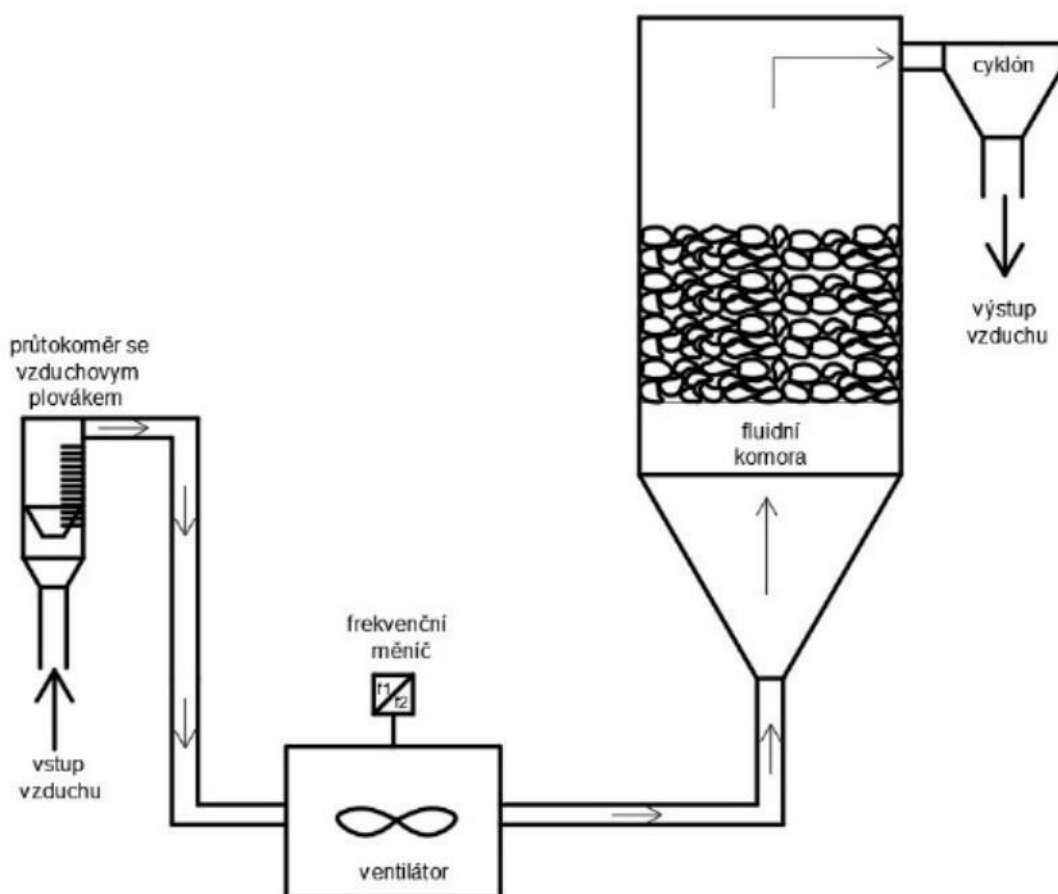
Experiment byl proveden na laboratorním zařízení umístěném v laboratořích Ústavu energetiky ČVUT. Toto zařízení se skládá z rotametru na sání vzduchu do zařízení, ventilátoru vybaveném frekvenčním měničem, fluidní komory a cyklónu. Vzduch je nasáván pomocí ventilátoru, který vytváří podtlak na vstupu. Za rotametrem je vzduch hnán do fluidní nádoby obdélníkového půdorysu o rozměrech 15 x 22,5 cm. Za výstupem fluidní nádoby je umístěn cyklón pro odstranění ulétnutých částic z nádoby. Za cyklónem následuje výstup vzduchu do okolí.

Regulování průtoku vzduchu je řešeno pomocí frekvenčního měniče otáček ventilátoru. Jestliže se navýší frekvence, zvýší se i průtok vzduchu na sání systému. Pro snížení průtoku vzduchu je nutné frekvenci snížit.

Zálohou pro ruční odečítání průtoku je automatické měření, které bylo v době provádění experimentu mimo provoz. Veškerý odečet průtoku bylo nutné co nejpřesněji odečíst manuálně.

Fluidní komora je vybavena dvěma snímači tlaku umístěnými před fluidní komorou a nad ní. Výstupem je tlaková diference mezi těmito čidly, jejichž výsledná data jsou ukládána pomocí softwaru.

Schéma laboratorního zařízení s popisky a naznačenými směry proudění vzduchu je zobrazeno na Obrázku 25.



Obrázek 25: Schéma laboratorního zařízení

5.2 Materiál pro experiment

Experiment byl proveden s dvěma druhy dřevních štěpek, olší a bukem. Pro olší byly k dispozici celkem dvě velikosti částic a pro buk tři. Z každého měření byly pomocí posuvného měřítka změřeny tři reprezentativní částice, z nichž byl udělán průměr pro další výpočty. Tabulky 10 až 14 zobrazují takto naměřené částice a je v nich vždy uveden i rozměr částic dle výrobce. Rozměr *a* označuje tloušťku, *b* šířku a *c* délku částice. Pro přehled byla spočtena odchylka průměrného rozměru od hodnoty uváděné výrobcem štěpky. Pracovní označení materiálů bylo provedeno pro přehlednost dle velikostí částic od nejmenšího po největší. Olše1 i buk1 odpovídá velikosti materiálu 0,75 x 6 x 4 mm. Buk2 je označení pro částice 1 x 4 x 8 mm a olše3 i buk3 značí materiál o velikosti 2 x 8 x 16 mm. Značení je vztaženo k velikostem udávaných výrobcem dřevní štěpky.

Tabulka 10: Rozměry částic pro materiál olše1

	a	b	c	
Částice I	1,1	2,7	3,8	mm
Částice II	0,5	2,1	4,6	mm
Částice III	1	1,6	5,2	mm
průměr	0,867	2,133	4,533	mm
Dle výrobce	0,75	2	4	mm
odchylka	0,117	0,133	0,533	mm

Tabulka 11: Rozměry částic pro materiál olše3

	a	b	c	
Částice I	1,7	9,9	17,5	mm
Částice II	1,2	6,3	9,8	mm
Částice III	2,9	8,7	9,3	mm
průměr	1,933	8,300	12,200	mm
Dle výrobce	2	8	16	mm
odchylka	0,067	0,300	3,800	mm

Tabulka 12: Rozměry částic pro materiál buk1

	a	b	c	
Částice I	0,8	2,7	4,1	mm
Částice II	0,6	2,6	3,7	mm
Částice III	0,7	2,9	3,6	mm
průměr	0,700	2,733	3,800	mm
Dle výrobce	0,75	2	4	mm
odchylka	0,050	0,733	0,200	mm

Tabulka 13: Rozměry částic pro materiál buk2

	a	b	c	
Částice I	1,2	4,5	5,1	mm
Částice II	1,5	4,5	7,6	mm
Částice III	1,7	4,7	6,3	mm
průměr	1,467	4,567	6,333	mm
dle výrobce	1	4	8	mm
odchylka	0,467	0,567	1,667	mm

Tabulka 14: Rozměry částic pro materiál buk3

	a	b	c	
Částice I	1,3	7,2	17,3	mm
Částice II	1,4	8,3	15,9	mm
Částice III	3,7	7,8	12,1	mm
průměr	2,133	7,767	15,100	mm
Dle výrobce	2	8	16	mm
odchylka	0,133	0,233	0,900	mm

Na Obrázcích 26 až 30 jsou fotografie jednotlivých materiálů. Pro lepší představivost o měřítku fotek byl na každý z materiálů položen metr.



Obrázek 26: Oleš1



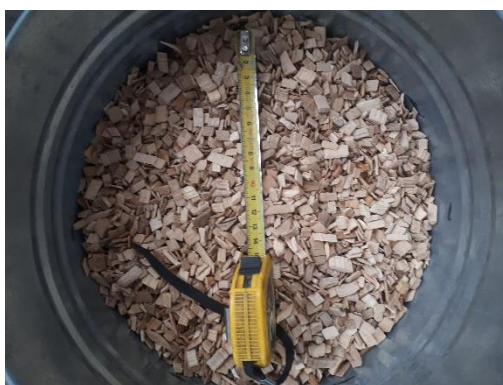
Obrázek 27: Oleš3



Obrázek 28: Buk1



Obrázek 29: Buk2



Obrázek 30: Buk3

5.3 Průběh experimentu

Před každým měřením byl nejdříve vložený materiál zvážen v plechové nádobě na digitální váze. Hmotnost plechové nádoby byla 0,902 kg. Po nasypání štěpky do fluidní nádoby byl materiál rozhrnut pomocí hrabadla tak, aby byl rozložen rovnoměrně. Následovalo měření výšky vrstvy materiálu uvnitř nádoby. Součinem H_{vrstva} a plochy nádoby byl získán počáteční objem vrstvy před fluidací V_0 . V Tabulce 15 jsou uvedeny naměřené hmotnosti vsázek a výšky vrstev pro jednotlivé materiály.

Tabulka 15: Naměřené hmotnosti a výšky vrstvy vsázek

	olše1	olše3	buk1	buk2	buk3
m_{celkem} [kg]	2,598	2,266	3,006	2,692	3,078
$m_{\text{vsázka}}$ [kg]	1,696	1,364	2,104	1,790	2,176
H_{vrstva} [cm]	24,5	20,5	23,5	20	24,5
V_0 [m ³]	0,0083	0,0069	0,0079	0,0068	0,0083

Po vložení vsázky a vyrovnání materiálu proběhl vlastní experiment. Postupným zvyšováním frekvence otáček ventilátoru se zvyšoval průtok vzduchu se kterým přímo souvisí i rychlost proudění. Platí, že rychlost proudění je funkcí průtoku ($u = f(Q)$). Pro přepočítání je možné využít vztahu uvedeném v rovnici (5.1) který vychází z definice objemového toku uzavřeným profilem. Pro výpočet je nutné plochu průřezu fluidační nádoby převést na jednotku metr ($A = 15 \times 22,5$ cm). Zvyšování rychlosti bylo prováděno až do chvíle, dokud nebyla viditelně překročena rychlost úletu (materiál ulétával ve velkém množství do cyklónu), nebo nebylo dosaženo maximum na optické ruční stupnici průtoku (160 m³/h). Poté začala probíhat fáze snižování se stejnými kroky jako u zvyšování frekvence. Pro ustálení dat a vytvoření reprezentativních průměrů, které mohly být dále zpracovávány, byl při každé změně frekvence brán úsek minimálně 30 vteřin. Pro vyhodnocování experimentu byly důležité naměřené tlakové ztráty vrstvy. Takto naměřená data obsahovaly součet ztrát vrstvy a samotného zařízení (distributoru). Aby bylo možné započítat samotnou tlakovou ztrátu vrstvy, bylo nutné provést měření „na-prázdko“.

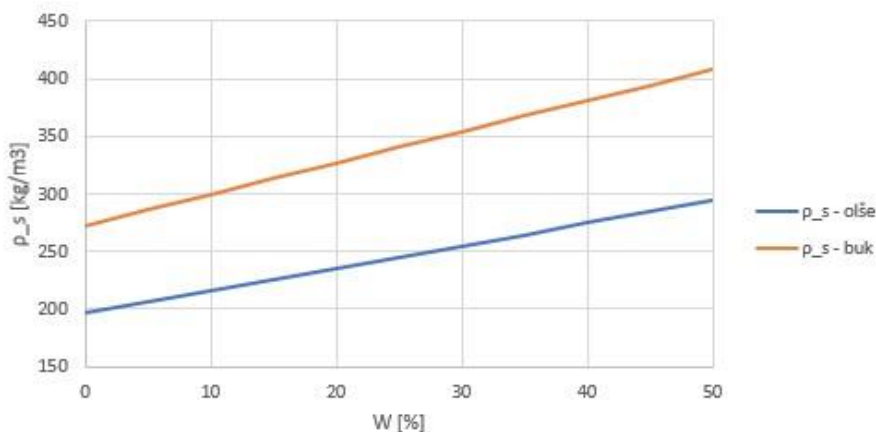
$$u = \frac{Q}{A} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (5.1)$$

5.4 Výpočet prahových rychlostí

Výpočet prahové rychlosti fluidace probíhal s využitím vzorců z kapitoly 4. Hlavním rozdílem v metodice je určení mezerovitosti. Zatímco v kapitole 4 bylo nutné mezerovitost určit pomocí Reynoldsova čísla, které záviselo na velikosti Archimedova čísla, zde byla mezerovitost určena pomocí hustoty a sypané hmotnosti. Sypaná hmotnost byla uvažována jako podíl hmotnosti vsázky $m_{vsázka}$ a objemu fluidní vrstvy před fluidací V_0 . Vztah je pro přehlednost uveden v rovnici (5.2).

$$\rho_s = \frac{m_{vsázka}}{V_0} \quad [kg \cdot m^{-3}] \quad (5.2)$$

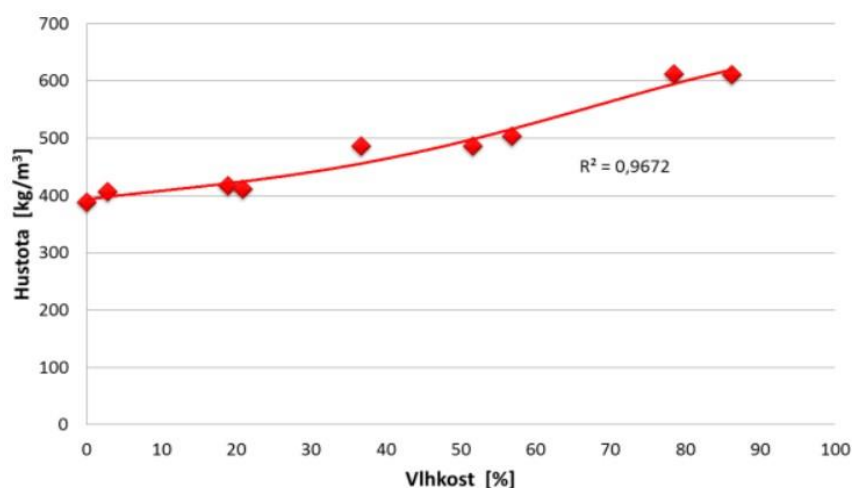
Ze zdroje [25] byla převzata tabulka, ve které jsou uvedeny hodnoty sypané hmotnosti pro různé dřevěné materiály při obsahu vody $W = 50\%$ a sušíně. Tyto dvě hodnoty byly zaneseny do grafu závislosti $\rho_s = f(W)$ jako body a lineárně proloženy. Reálná závislost není lineární, nicméně chyba v lineárním proložení od reálné závislosti je minimální. Pomocí tohoto grafu lze odečíst obsah vody W pro vypočtenou sypanou hmotnost. Jelikož je sypaná hmotnost závislá mimo obsahu vody také na velikosti částic, které nemusely být ve zdroji [25] totožné s velikostí částic pro experiment, je toto určení pouze orientační. Odhadovaná chyba určení je přibližně $\pm 5\%$ W . Výsledné závislosti sypaných hmotností olše a buku jsou uvedeny na Obrázku 31.



Obrázek 31: Závislost ρ_s na W pro olši a buku

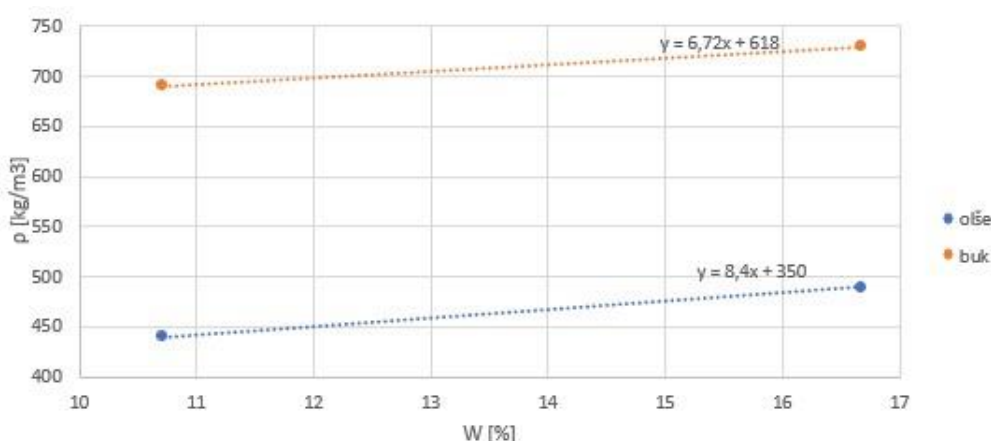
Z internetové kalkulačky hustot pro různé dřevěné materiály, uvažováno jako zdroj [33], byly převzaty hodnoty hustoty olše a buku pro vlhkost 12% a 20% . Tyto dva body byly zaneseny do grafu a lineárně proloženy. Z grafu závislosti hustoty na vlhkosti zobrazeném na Obrázku 32 (převzato ze zdroje [34]) je patrné, že lineární proložení nedělá nijak zásadní chybu v určení. Přestože se jedná o závislost smrkového dřeva, lze konstatovat, že u jiných druhů dřev bude průběh přibližně podobný. V rovnici (5.3) je uveden přepočítaný obsah vody, který vychází z definic obou těchto veličin (rovnice (2.1) a (2.2)). Dle tohoto výpočtu odpovídá 12% vlhkosti obsah vody $10,7\%$ a pro vlhkost $= 20\%$ je $W = 16,7\%$.

$$W = \frac{\phi}{\phi + 1} \quad [1] \quad (5.3)$$



Obrázek 32: Závislost hustoty smrkového dřeva na vlhkosti [34]

Na Obrázku 33 jsou zobrazeny grafy závislosti obsahu vody na hustotě pro olši a buk vycházející z hodnot získaných ze zdroje [33].



Obrázek 33: Graf závislosti hustoty olše a buku na W

Z již známé hodnoty obsahu vody W byla pomocí grafu na Obrázku 33 odečtena hustota pro olši a buk ke všem daným velikostem částic. Následně byla určena mezovitost jako podíl sypané hmotnosti a hustoty. Výpočtový vztah je uveden v rovnici (5.4).

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_s}{\rho} \quad [1] \quad (5.4) [27]$$

V Tabulce 16 jsou uvedeny výsledné hodnoty z výše popsaného postupu. Pro bukové štěpky nebylo možné postup použít, protože výsledná sypaná hmotnost je nižší, než uvažuje zdroj [25] pro sušinu. Obsah vody by tedy vyšel záporný. Tento fakt je způsoben uvažováním jiné granulometrie štěpky ze zdroje, než byla k dispozici pro experiment. Obsah vody pro buky byl zvolen 3,5 %, protože tato hodnota je velmi blízká výsledným hodnotám W pro olše. Do této tabulky bylo zařazeno hodnocení typu materiálu dle Gildartova diagramu, který je uveden na Obrázku 10.

Tabulka 16: Výsledné hodnoty sypané hmotnosti, hustoty a mezerovitosti

	olše1	olše3	buk1	buk2	buk3
$\rho_s [kg \cdot m^{-3}]$	205,1	197,1	265,3	265,2	263,2
W [%]	4,6	0,6	3,5	3,5	3,5
$\rho [kg \cdot m^{-3}]$	389	355	641,5	641,5	641,5
$\varepsilon [1]$	0,47	0,45	0,59	0,59	0,59
Zařazení materiálu dle Gildartova diagramu	D	D	D	D	D

Nadále bylo postupováno totožným postupem výpočtu, který popisují rovnice (4.1) až (4.7). Výstupy z těchto rovnic jsou: plocha a objem zadané částice $S_{zč}$ a $V_{zč}$ (zde průměrné částici z výběru tří kusů materiálu), adekvátní průměr kulové částice d , plocha adekvátní kulové částice $S_{kč}$, sféricita σ a Archimedovo číslo Ar . Výsledné hodnoty těchto veličin pro všechny zde uvažované materiály jsou uvedeny v Tabulce 17.

Tabulka 17: Výsledné hodnoty veličin pro dílčí výpočty experimentu

	olše1	olše3	buk1	buk2	buk3
$S_{zč} [m^2]$	30,9	281,8	29,9	89,8	332,1
$V_{zč} [m^3]$	8,4	195,8	7,3	42,4	250,2
$d [mm]$	2,5	7,2	2,4	4,3	7,8
$S_{kč} [m^2]$	19,9	163,1	18,1	58,8	192,0
$\sigma [1]$	0,65	0,58	0,61	0,66	0,58
$Ar [1]$	174 937	3 727 854	250 527	1 461 651	8 620 866

Změna ve výpočtu proběhla i v určování Reynoldsova čísla pro prahovou rychlost fluidace Re_{pr} . Tato hodnota byla počítána ze vztahu pro určení Archimedova čísla podle rovnice (3.8). Vztah je uveden v rovnici (5.5). Jelikož jsou všechny zde uvedené veličiny známy, je možné rovnici anulovat a nadále řešit jako kvadratickou rovnici. Ze dvou kořenů je pro další výpočty správný kladný výsledek. V případě nezápornosti obou kořenů je nutný odborný inženýrský odhad hodnoty, která se více blíží klasickým výsledkům.

$$\frac{1,75}{\varepsilon^3 \cdot \sigma} Re_{pr}^2 + \frac{150 \cdot (1 - \varepsilon)}{\varepsilon^2 \cdot \sigma^2} Re_{pr} = Ar \quad (5.5)$$

Výpočet prahové rychlosti byl proveden podle upravené rovnice (3.4). Konečný tvar pro výpočet u_{pr} je uveden v rovnici (5.6).

$$u_{pr} = \frac{Re_{pr} \cdot \mu}{\rho_{vz} \cdot d_m} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (5.6)$$

Výsledky výpočtu Reynoldsova čísla, jeho mezivýpočty a výsledné prahové rychlosti jsou prezentovány v Tabulce 18.

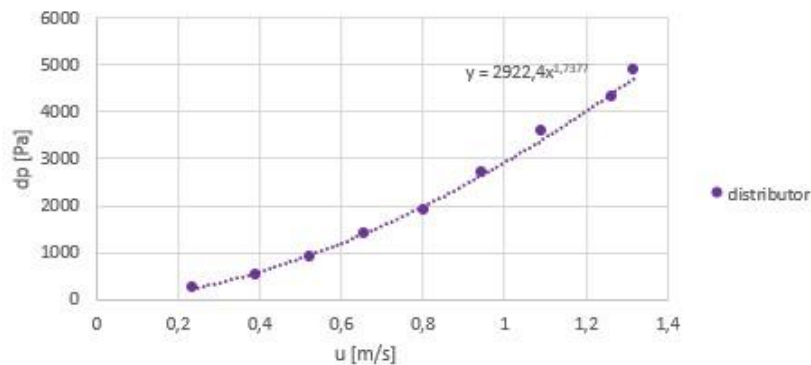
Tabulka 18: Reynoldsovo číslo, mezivýpočty a prahová rychlost fluidace

	olše1	olše3	buk1	buk2	buk3
$Re_{pr,1}$ [1]	54,7	290,6	106,3	306,3	734,6
$Re_{pr,2}$ [1]	-124,7	-372,9	-164,8	-360,4	-795,4
Re_{pr} [1]	54,7	290,6	106,3	306,3	734,6
u_{pr} [1]	0,39	0,72	0,79	1,26	1,68

5.5 Vyhodnocení experimentu

Pro možné vyhodnocení výsledků v podobě porovnání výpočtu prahové rychlosti s grafy zobrazující závislost tlakové ztráty vrstvy na rychlosti byl průtok přepočten na rychlost proudění.

Nejprve bylo nutné vytvořit graf závislosti tlakové ztráty Δp na rychlosti proudění vzduchu, do kterého byly vyneseny hodnoty jako body. Tyto body byly proloženy mocninnou funkcí. Takto získaná tlaková ztráta samotného distributoru byla vždy pro danou rychlost odečtena od celkové tlakové ztráty naměřené při fluidaci materiálů. Graf závislosti tlakové ztráty na rychlosti proudění je zobrazen na Obrázku 34.



Obrázek 34: Graf $dp = f(u)$ pro distributor

Na Obrázcích 35, 38, 41, 44 a 47 jsou pořízené fotky v průběhu experimentu při dosažení maximální možné rychlosti. Vytvořené kanály, pilíře, klenby a další útvary mají přímý vliv na měření tlakové ztráty vrstvy. Z výsledků je patrné, že u každého měření se fluidovaný materiál nevrátil zpět na původní výšku, nýbrž zůstal „načechrán“ na vyšší hodnotě výšky vrstvy než byl fluidací. Tento fakt je možno pozorovat na Obrázcích 36, 39, 42, 45 a 48. Na Obrázcích 37, 40, 43, 46 a 49 jsou zobrazeny vytvořené grafy závislosti tlakových ztrát fluidní vrstvy na rychlosti proudění pro jednotlivé fluidované materiály během experimentu. Do těchto grafů byla pro porovnání vyznačena vypočtená

prahová rychlost fluidace. Teoreticky začíná materiál fluidovat ve chvíli, kdy křivka závislosti $\Delta p = f(u)$ změni rostoucí trend v klesající a měla by následovat rovnoběžka s osou rychlosti. Jak je z grafů patrné, tento děj se neděje u žádného z nich. To je způsobeno především tím, že pro experiment byly zvoleny hůře nebo těžce fluidovatelné materiály. Vypočtená rychlost neodpovídá teoretické prognóze, která by měla být zřejmá z grafů, z důvodu nepřesností, nejistot a nestálému chování materiálů při fluidaci.

Obrázek 35 zachycuje olší1 při nejvyšší rychlosti proudění u_{MAX} rovno $0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Přestože materiál fluiduje téměř v celé vrstvě, jsou zde náznaky tvorby kanálů. Velmi jemné částičky se díky elektrostatickému napětí nalepily na stěny nádoby a jejich následné odstranění bylo velmi obtížné. Na Obrázku 36 je fotografie stavu olše1 po fluidaci a na Obrázku 37 grafické znázornění tlakové ztráty vrstvy na rychlosti proudění.

Obrázek 38 zachycuje olší3 při nejvyšší rychlosti proudění u_{MAX} rovno $1,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. V porovnání s předchozí velikostí tohoto materiálu jsou zde jasně viditelné kanály. Materiál v dolní části vrstvy nefluiduje vůbec, nicméně v horní části vrstvy fluidace proběhla. Na Obrázku 39 je fotografie stavu olše3 po fluidaci a na Obrázku 40 grafické znázornění tlakové ztráty vrstvy na rychlosti proudění.

Obrázek 41 zachycuje buk1 při nejvyšší rychlosti proudění u_{MAX} rovno $1,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Jak je již na první pohled zřejmé, v porovnání s olší1, která má stejnou velikost, buková štěpka fluiduje hůře. Tento fakt je způsoben tím, že bukové dřevo má vyšší hustotu než olše a je tudíž těžší. Na Obrázku 42 je fotografie stavu buku1 po fluidaci a na Obrázku 43 grafické znázornění tlakové ztráty vrstvy na rychlosti proudění.

Obrázek 44 zachycuje buk2 při nejvyšší rychlosti proudění u_{MAX} rovno $1,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Lze prohlásit, že tento materiál fluídoval pouze z části a nekonstantně. Byly zde vytvořeny kanály a v dolní části vrstvy je patrný náznak klenby. Na Obrázku 45 je fotografie stavu buku1 po fluidaci a na Obrázku 46 grafické znázornění tlakové ztráty vrstvy na rychlosti proudění.

Obrázek 47 zachycuje buk3 při nejvyšší rychlosti proudění u_{MAX} rovno $1,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Jak je na první pohled zřejmé, tento materiál tvořil pouze kanály, a v dolní části vrstvy klenbu. V okolí maximální rychlosti se pouze několik menších částic vzneslo a byly uneseny rovnou do cyklónu. Na Obrázku 48 je fotografie stavu buku1 po fluidaci a na Obrázku 49 grafické znázornění tlakové ztráty vrstvy na rychlosti proudění.

Přestože žádný z daných materiálů není příliš vhodný pro fluidaci, je možné z grafů vyzorovat, že u olše1 i 3 a buku1 probíhal fluidní proces. Toto konstatování je doloženo i fotografiemi z průběhu experimentu. Pro buk2 lze prohlásit, že tento materiál je mezní hodnotou pro fluidaci bukové štěpky. Dle grafu i pořízené fotografie je jasně vidět, že tento materiál v určitých částech fluídoval, ale v úsecích fluidní vrstvy se pouze materiál pohyboval, tvořil komíny, klenby a jiné útvary. U největších částic tvrdého materiálu (buk3) nelze s jistotou tvrdit, že probíhala fluidace v přesném slova smyslu. Materiál různě pracoval, ale nevznesl se.

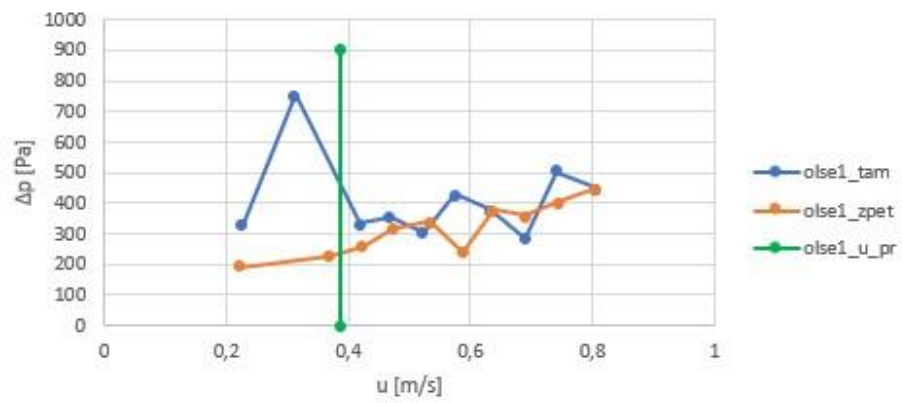
Při experimentu bylo pozorováno tvoření klenby, tunelů a jiných útvarů, které mají přímý vliv na měření tlakové ztráty fluidní komory. Prakticky lze konstatovat, že čím větší částice materiálu, tím méně docházelo k fluidaci. Mimo velikosti částic jsou tyto jevy taktéž závislé na hustotě daného materiálu (hmotnosti jednotlivých částic). Právě z tohoto důvodu není měření uhlazené, nýbrž rozhozené podle toho, kde a kdy se zrovna vytvořil nějaký úvar ve vrstvě. Hodnoty, jejichž vynesení do grafů bylo tzv. „ustřelené“ od průběhu ostatními body byly z vyhodnocování vyloučeny a nahrazeny lineárně proloženou křivkou od bodu před tímto nevyhovujícím bodem do bodu za nevyhovujícím bodem.



Obrázek 35: Olše1 při u_{MAX}



Obrázek 36: Stav po fluidaci olše1



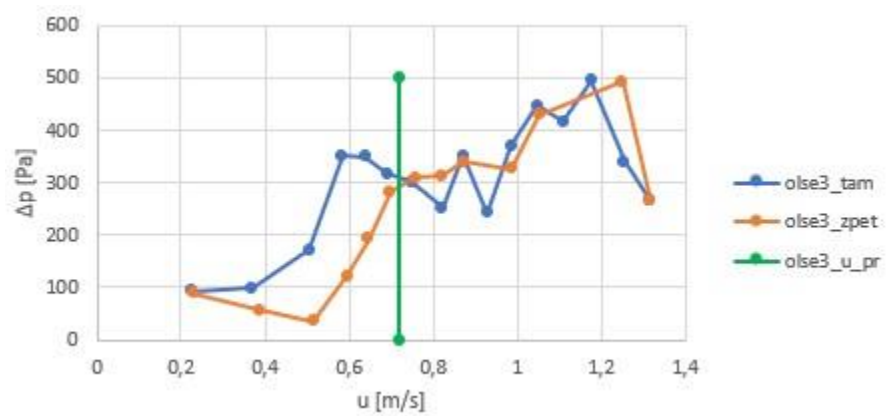
Obrázek 37: Vliv rychlosti proudění na Δp – olše1



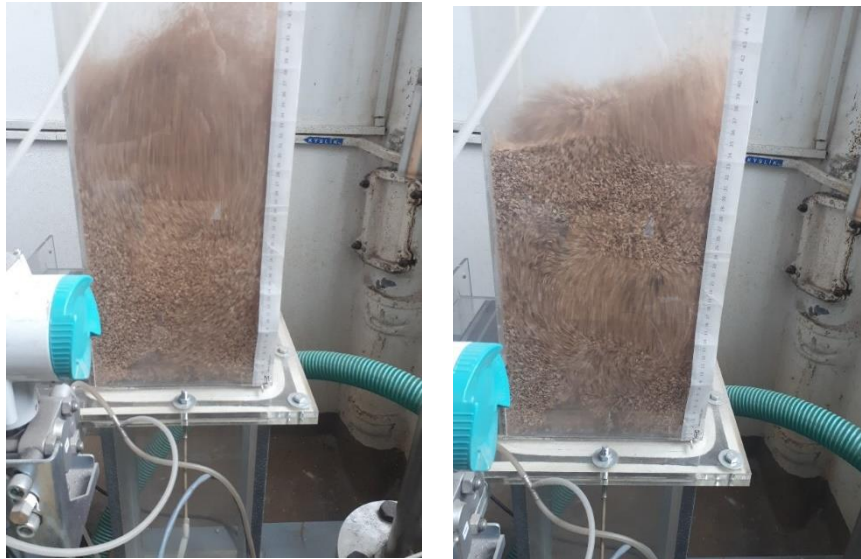
Obrázek 38: Olše3 při u_{MAX}



Obrázek 39: Stav po fluidaci olše3



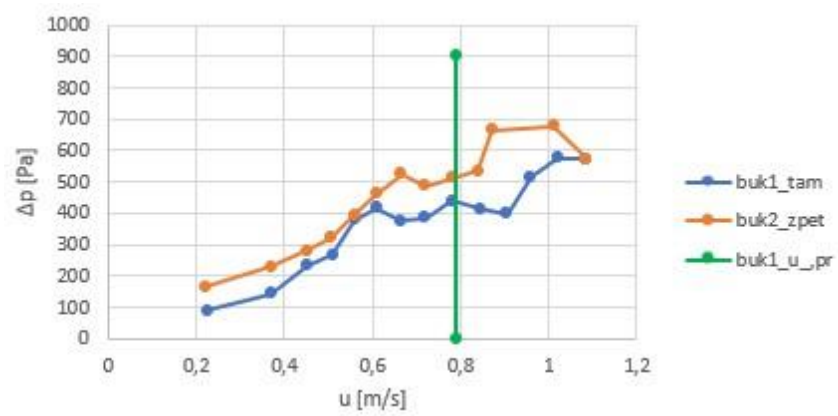
Obrázek 40: Vliv rychlosti proudění na Δp – olše3



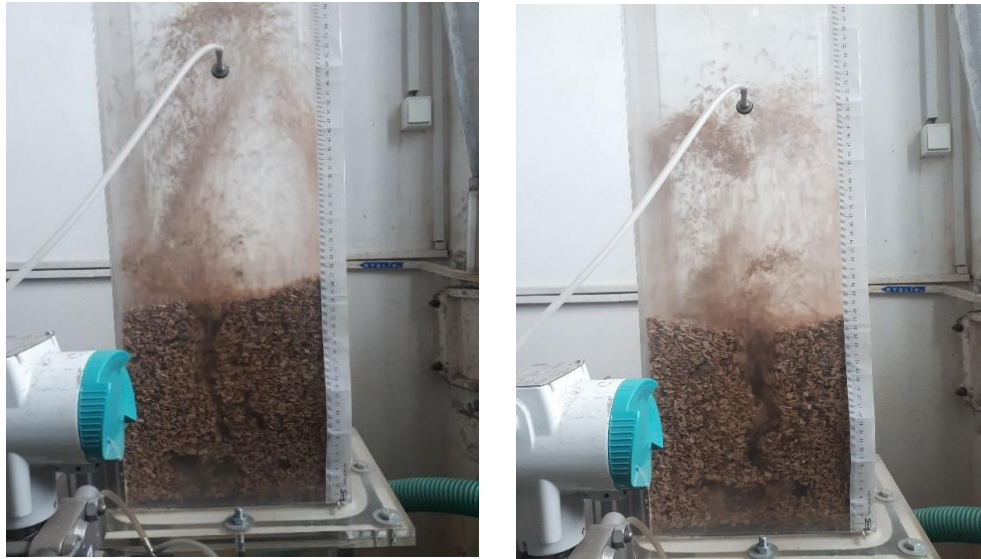
Obrázek 41: Buk1 při u_{MAX}



Obrázek 42: Stav po fluidaci buk1



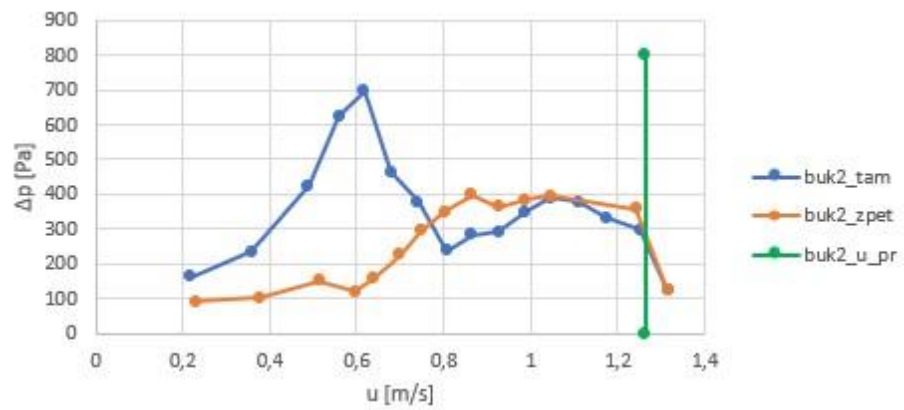
Obrázek 43: Vliv rychlosti proudění na Δp – buk1



Obrázek 44: Buk2 při u_{MAX}



Obrázek 45: Stav po fluidaci buk2



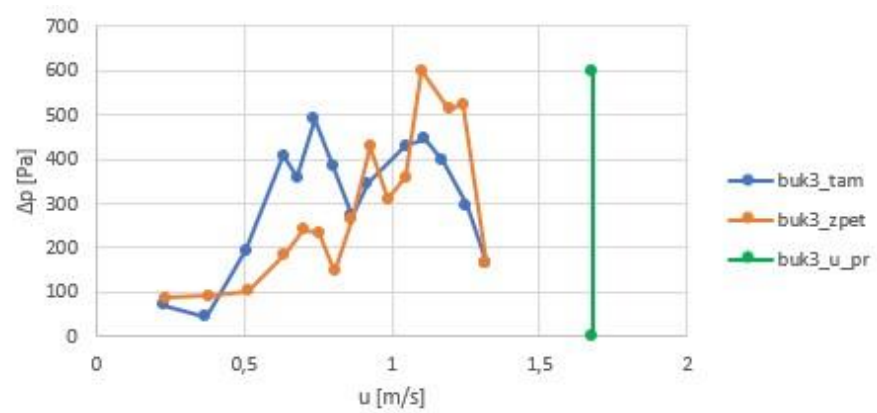
Obrázek 46: Vliv rychlosti proudění na Δp – buk2



Obrázek 47: Buk3 při u_{MAX}

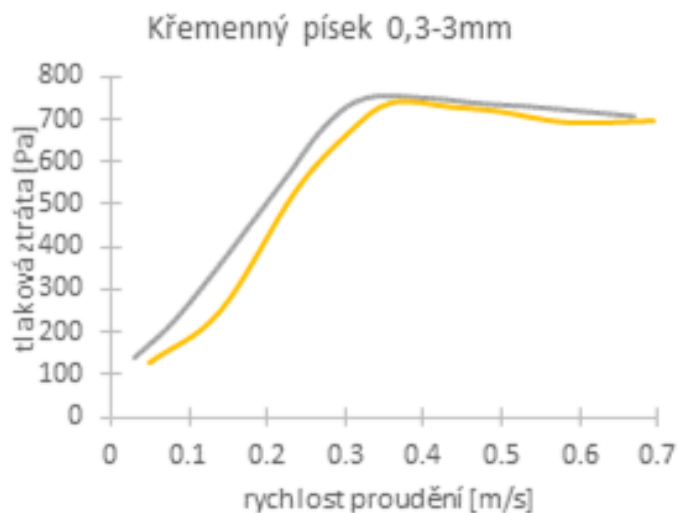


Obrázek 48: Stav po fluidaci buk3



Obrázek 49: Vliv rychlosti proudění na Δp – buk3

Pro porovnání grafů závislosti tlakové ztráty fluidní vrstvy na rychlosti proudění byl od vedoucího práce získán průběh z měření křemičitého písku o granulometrii 0,3 až 3 mm. Tento materiál je mnohem lépe fluidovatelný než dřevní štěpka, která byla k dispozici pro experiment této diplomové práce. Graf je zobrazen na Obrázku 50.



Obrázek 50: Převzatý graf ze školní laboratorní úlohy

Zatímco u křemičitého písku je průběh tlakové ztráty v závislosti na rychlosti téměř hladký, u provedených měření týkajících se experimentální části diplomové práce jsou průběhy nehladké. To je způsobeno především volbou materiálů pro fluidaci, kde křemičitý písek se mnohem lépe fluiduje, než zvolená dřevní štěpka. V teoretické rovině nastává fluidace po dosažení prahové rychlosti fluidace, což je např. na Obrázku 50 stav, kdy se mění rostoucí trend křivky tlakové ztráty na klesající. Po tomto okamžiku by se po krátkém klesání křivky měla tato křivka ustálit na konstantní hodnotě. Porovnáním grafu na Obrázku 50 s teoretickým průběhem na Obrázku 11 lze konstatovat, že křemičitý písek, který lze zařadit do skupiny materiálů B dle Geldartova diagramu, fluiduje téměř dokonale dle teorie. Dřevní štěpky byly zařazeny do kategorie D, čemuž odpovídají i průběhy tlakových ztrát na rychlosti a průběhy se při porovnání s Obrázkem 11 shodují s teorií jen částečně, a to jen u některých materiálů (olše1, olše3 a buk1).

Těžko fluidovatelný materiál, který byl zvolen pro zkoumání pomocí experimentu fluidoval v závislosti na velikosti částic. Nejmenší částice fluidovaly obstojně, u olšového dřeva lze říci, že fluidace proběhla i u větších částic tohoto materiálu. U tvrdého dřeva probíhala především kanálková fluidace, která byla lehce pozorovatelná i u fluidace menších částic. Výpočtová rychlost u většiny grafů nenaplnila očekávání, což je způsobeno především tím, že se nedosáhlo úplné fluidace.

Rovnice užité pro výpočet prahové rychlosti platí pro stav fluidace. Čím více je tato rychlost vzdálená očekávatelnému průběhu pro plně fluidovaný materiál, tím více jsou výpočtové rovnice nepřesné, nebo neplatí vůbec. U olše 1 i 3 a buku1 lze podle polohy vypočtené rychlosti konstatovat, že bylo dosaženo téměř plně fluidovaného stavu. Naopak u buku 2 a 3 z porovnání vypočtené prahové rychlosti a průběhu tlakové ztráty bylo usouzeno, že fluidace zde probíhala velmi obtížně nebo vůbec. Tyto závěry plně potvrzují pořízené fotografie v průběhu experimentu.

6 Optimalizace fluidní sušárny.

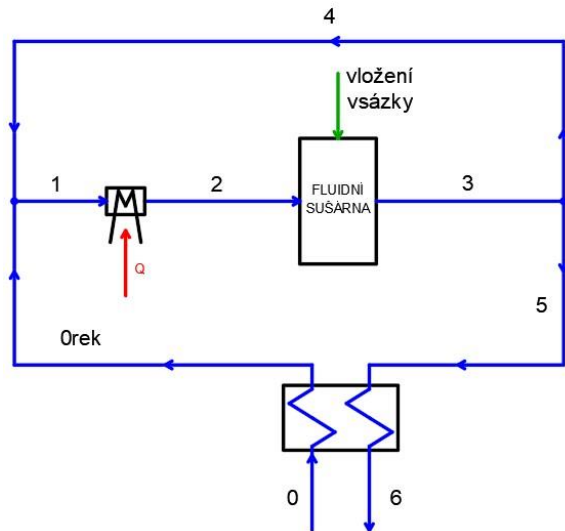
Při optimalizaci nastavení fluidní sušárny bylo uvažováno se schématickým zobrazením, které je na Obrázku 51. Toto schéma vychází z Obrázku 23.

6.1 Optimalizace pro jednu fluidní rychlost

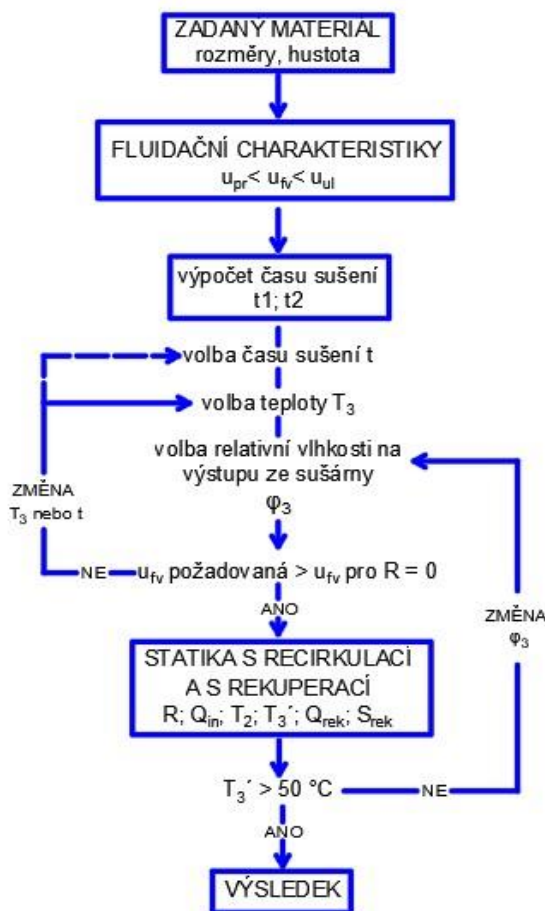
Pro tento typ optimalizace byla zvolena štěpka z olše o rozměrech 1 x 3 x 6 mm. Jedním z důvodů pro volbu tohoto materiálu byl i fakt, že se jedná o materiál patřící do skupiny rychle rostoucích dřevin a lze ho produkovat jako cíleně pěstovanou biomasu.

Bylo vytvořeno pracovní schéma popisující proces optimalizace krok po kroku. Toto schéma se nachází na Obrázku 52.

Vlastnosti vzduchu stejně se všemi ostatními veličinami, které nejsou jinak definovány, byly ponechány z kapitoly 4. Všechny takto zvolené hodnoty byly pro další výpočty uvažovány jako konstanty. Hustota olšového dřeva byla pomocí grafu na Obrázku 33 určena na $770 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,



Obrázek 51: Pracovní schéma pro optimalizaci



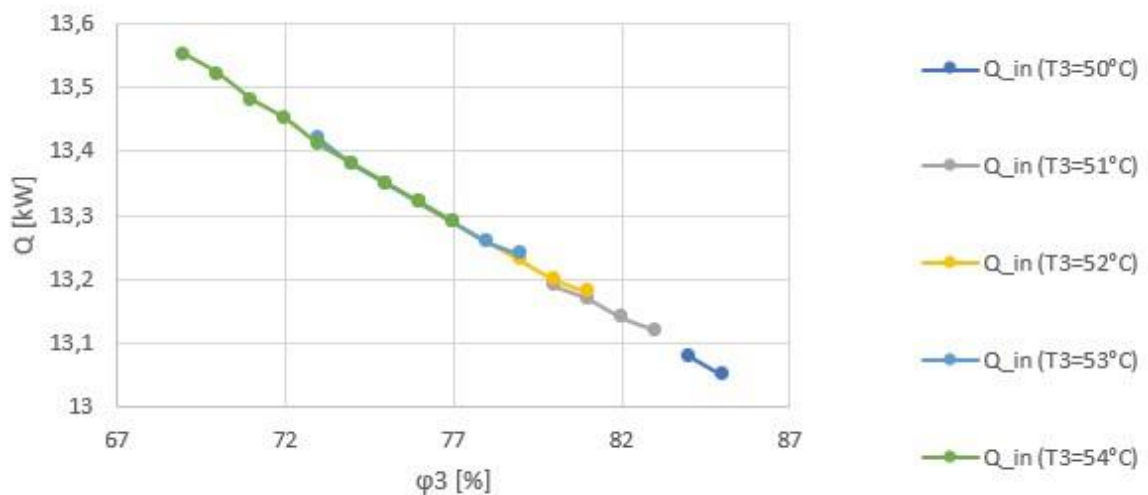
Obrázek 52: Schéma postupu optimalizace

což odpovídá čerstvému dřevu s obsahem vody 50 %. Násobitel prahové fluidní rychlosti pro získání rychlosti vzduchu ve fluidní komoře byl zvolen 3. Za těchto podmínek je výsledná fluidační rychlost $2,37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Optimalizace byla provedena pro celkem pět výstupních teplot ze sušárny (odpovídá větví 3). Teploty byly voleny v rozsahu od 50 do 54 °C s krokem 1 °C. Výpočet probíhal pro různé relativní vlhkosti vzduchu na výstupu ze sušárny ϕ_3 . Podmínka pro výpočet byla, aby teplota vzduchu po druhé fázi předávání tepla (fáze vypařování vody z materiálu) neklesla pod 50 °C. Pracovně byla tato teplota označena T'_3 . Touto podmínkou je zaručena fyzikální smysluplnost modelu, konkrétně druhý zákon termodynamiky. Při dodržení této podmínky je taktéž zaručeno, že vodní pára nebude kondenzovat (není překročen rosný

bod). Další nutnou podmínkou pro výpočet bylo dodržení vypočteného hmotnostního toku tak, aby odpovídal požadované fluidační rychlosti. Toto kritérium je splnitelné pouze pokud platí: $u_{fv, požadavek} > u_{fv, R=0}$. Díky tomuto kritériu lze pomocí recirkulačního koeficientu R optimalizovat celkový průtok tak, aby rychlost ve fluidní komoře odpovídala požadované rychlosti z výpočtu fluidních charakteristik. Kontrola fluidní rychlosti, která musí ležet mezi prahovou rychlostí a úletovou, byla prováděna automaticky. Aby bylo možné vzájemné porovnání variant, byl uvažován totožný čas pro sušení 360 s. Jedním z hlavních kritérií optimalizace byl co nejmenší požadavek na přivedené teplo.

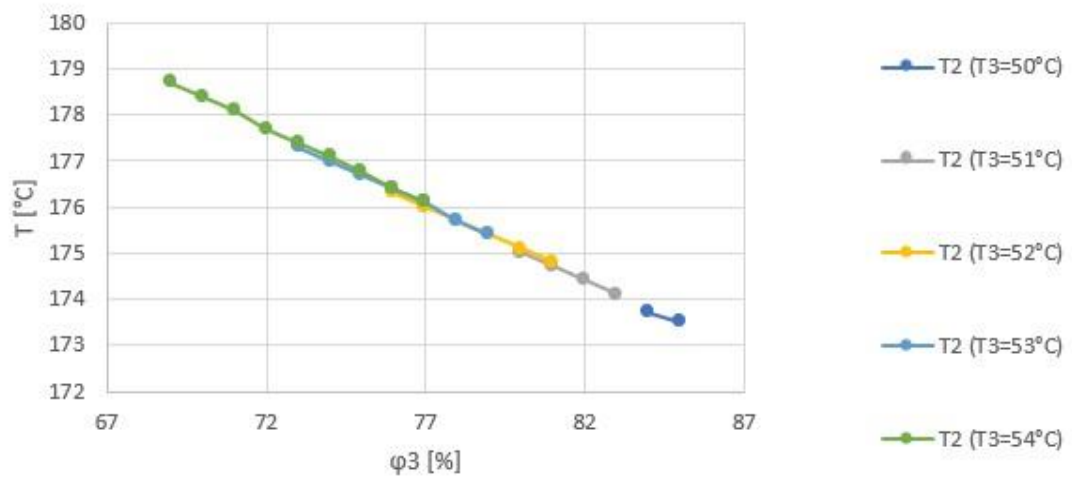
Pro vzájemné porovnání byly sledovány následující veličiny: potřebný tepelný výkon (Q_{in}), teplota na vstupu do sušárny (T_2), recirkulační parametr (R), teplota po dokončené druhé fázi sušení (T'_3), výkon rekuperačního výměníku (Q_{rek}) a potřebná plocha rekuperačního výměníku (S_{rek}).

Na Obrázku 53 jsou zobrazeny závislosti potřebného tepelného výkonu v závislosti na výstupní relativní vlhkosti.



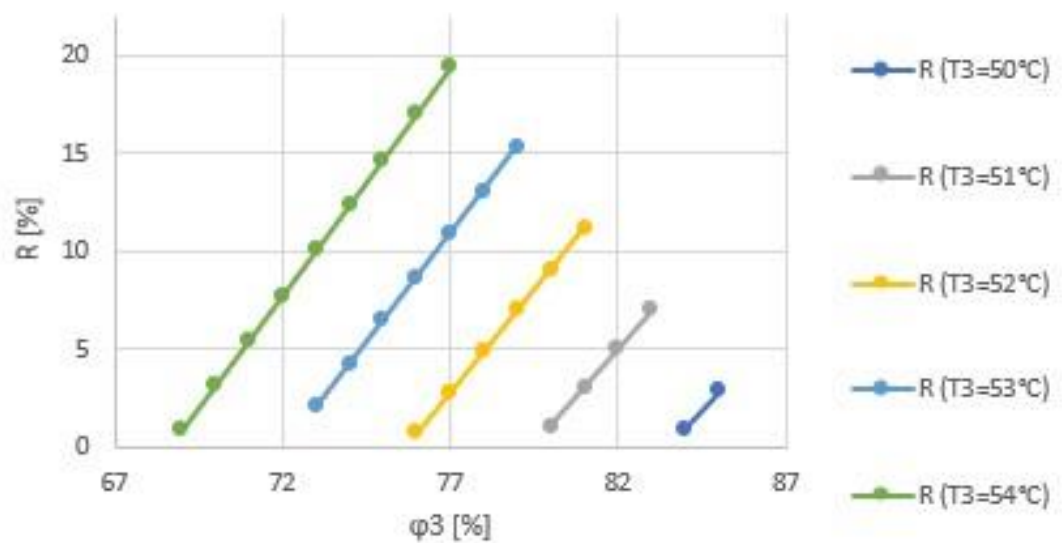
Obrázek 53: Závislost Q_{in} na φ_3

Na Obrázku 54 jsou zobrazeny závislosti potřebné teploty na vstupu do sušárny v závislosti na výstupní relativní vlhkosti.



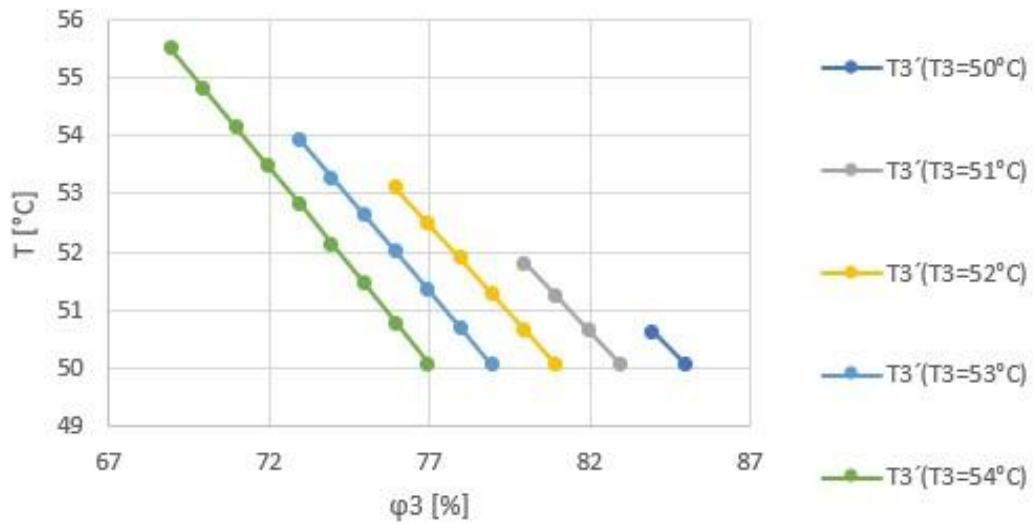
Obrázek 54: Závislost T_2 na φ_3

Na Obrázku 55 jsou zobrazeny závislosti recirkulačního parametru v závislosti na výstupní relativní vlhkosti.



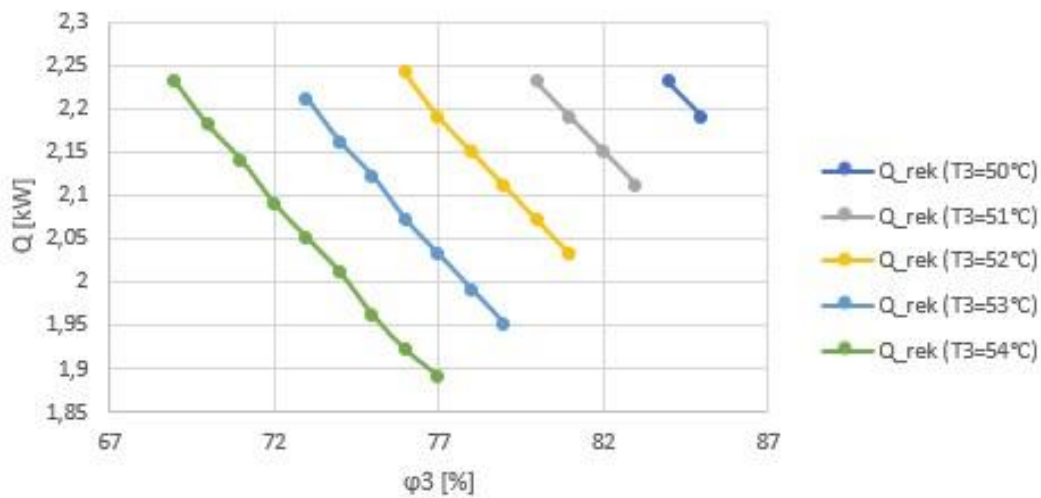
Obrázek 55: Závislost R na φ_3

Na Obrázku 56 jsou zobrazeny závislosti teploty po dokončené druhé fázi sušení v závislosti na výstupní relativní vlhkosti.



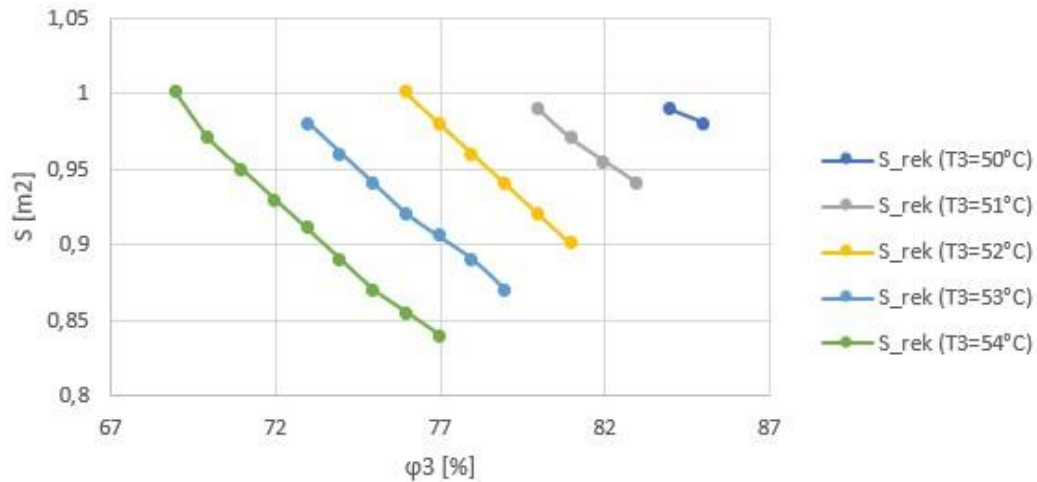
Obrázek 56: Závislost T_3' na φ_3

Na Obrázku 57 jsou zobrazeny závislosti tepelného výkonu rekuperačního výměníku v na výstupní relativní vlhkosti.



Obrázek 57: Závislost Q_{rek} na φ_3

Na Obrázku 58 jsou zobrazeny potřebné teplosměnné plochy rekuperačního výměníku tepla v závislosti na výstupní relativní vlhkosti.



Obrázek 58: Závislost S_{rek} na φ_3

Jak je z grafů na Obrázcích 53 až 58 patrné, se zvyšující se výstupní teplotou je nutné pro zachování fyzikální smysluplnosti snižovat nároky na výstupní relativní vlhkost. Tento fakt znamená, že čím větší výstupní teplota, tím méně se nasatí sušící vzduch a stoupá potřeba hmotnostního toku na vstupu do systému. Ze zvyšujícími se požadavky na sušící vzduch roste i potřeba tepla dodaného do systému, tím pádem i náklady s ním spojené.

Největší úspory tepla se dosáhne při nižších frekvencích pro dané teploty, přičemž teplosměnná plocha výměníku roste s nižší frekvencí jen velmi málo. Vyšší hodnoty úspor tepla odpovídají nutnosti vyšším hodnotám přivedeného tepla při nižším nasycení výstupního vzduchu vodní parou.

Jako optimální varianta byla vybrána teplota $T_3 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, protože v porovnání s ostatními variantami má nižší požadavky na dodané teplo a teplota před sušárnou je nejmenší z uvažovaných, tudíž je tato varianta nejlepší z hlediska bezpečnosti samovolného vznícení dřevní štěpky uvnitř sušárny. Při výběru vhodné relativní vlhkosti byla zvolena minimální možná pro tuto variantu $\varphi_3 = 84 \text{ } \%$. V Tabulce 19 jsou zobrazeny hodnoty pro zvolenou optimální variantu.

Tabulka 19: Hodnoty pro vybranou optimální variantu

	Q_{in} [kW]	T_2 [°C]	R [%]	T_3' [°C]	Q_{rek} [kW]	S_{rek} [m²]
$T_3 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ $\varphi_3 = 84 \text{ } \%$	13,1	173,7	0,93	50,6	2,2	1,0

6.2 Přínos rekuperace

Pro výzkum přínosu rekuperace na konkrétním případě byla uvažována ideální varianta z předchozí optimalizace. V Tabulce 20 jsou zobrazeny výsledné hodnoty. Při zadání totožných parametrů a odstranění rekuperačního výměníku vychází teplota T_3' menší než požadovaných 50 °C a takováto konfigurace tedy nedává smysl. Při snížení výstupní relativní vlhkosti z 84 na 83 % sice tato teplota lehce 50 °C překročila, nicméně progres zde není dostatečný a bylo nutné přistoupit k dalšímu snížení nasycení sušícího vzduchu vodní parou. Takováto konfigurace již fyzikálně vyhovuje zadaným podmínkám a výsledné hodnoty této varianty byly porovnány s hodnotami s uvažovanou rekuperací. Řádek ROZDÍL zobrazuje rozdíl hodnot varianty bez rekuperace ($T_3 = 50$ °C; $\varphi_3 = 82$ %) oproti variantě s rekuperací ($T_3 = 50$ °C; $\varphi_3 = 84$ %). Teplota T_3' zde vyšla totožná, ale již na první pohled je jasné, že z hlediska přivedeného tepla, teploty před sušárnou a nutnosti recirkulace vychází u varianty bez rekuperátoru vyšší.

Tabulka 20: Hodnoty pro optimální variantu bez rekuperace tepla

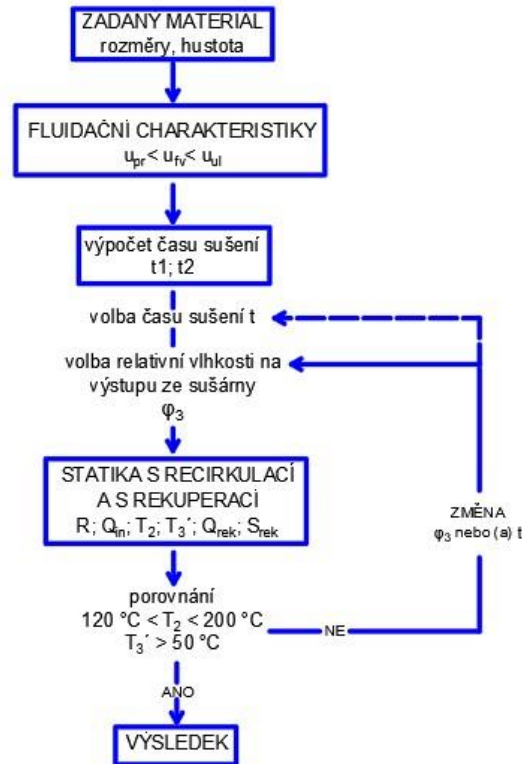
	Q_{in} [kW]	T_2 [°C]	R [%]	T_3' [°C]	Q_{rek} [kW]	S_{rek} [m ²]
$T_3 = 50$ °C $\varphi_3 = 84$ %	14,7	178,4	31,07	49,5	0	0
$T_3 = 50$ °C $\varphi_3 = 83$ %	14,8	178,6	29,2	50,0	0	0
$T_3 = 50$ °C $\varphi_3 = 82$ %	14,9	178,9	27,3	50,6	0	0
ROZDÍL	+1,8	+5,2	+26,37	0	-	-

Bylo dokázáno, že rekuperátor se vyplatí zařadit do oběhu z důvodů nižšího požadavku na tepelný výkon, nižší teploty před sušárnou, což zaručuje větší bezpečnost proti samovolnému vznícení sušeného materiálu a nižší požadavek na recirkulaci vzduchu, se kterou souvisí např. menší průměr potrubí pro recirkulační větev. Z kapitoly 4 vyplývá výhodnost rekuperačního výměníku z hlediska vyššího možného rozsahu pro nastavení recirkulačního parametru R.

6.3 Optimalizace při různých rychlostech fluidace

Optimalizace při různých rychlostech fluidace byla provedena pro olši se vstupními parametry totožnými jako v kapitole 6.1. Tato rychlost je přímo závislá na velikosti částic, což bylo dokázáno v kapitole 5, ve které byl řešen experiment.

Bylo vytvořeno pracovní schéma popisující proces optimalizace krok po kroku. Toto schéma se nachází na Obrázku 59.



Obrázek 59: Schéma postupu optimalizace

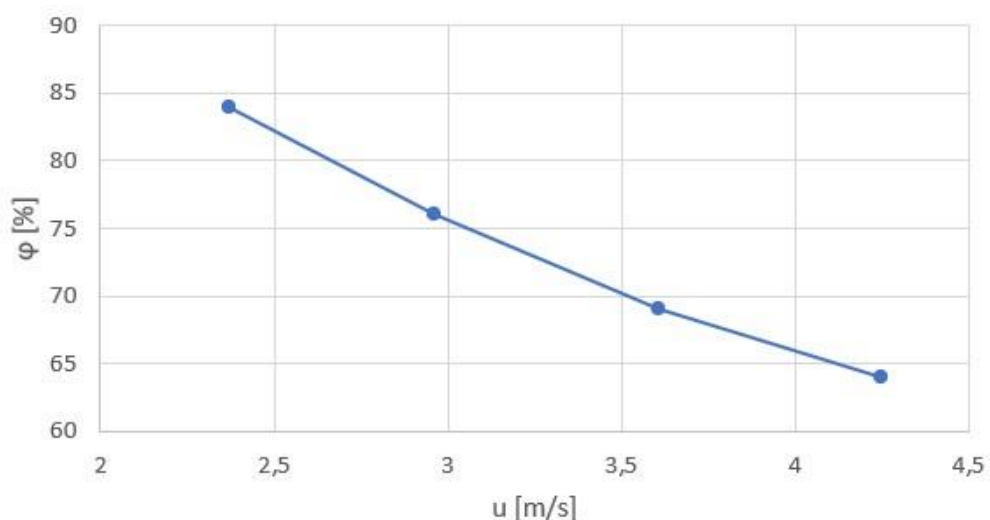
Pro optimalizaci bylo zvoleno celkem pět prahových rychlostí, pro které byl následně proveden výpočet. Tyto rychlosti jsou zobrazeny v Tabulce 21. Spolu s prahovými rychlostmi jsou zde zobrazeny také rychlosti ve fluidní vrstvě a úletové rychlosti. Kromě rychlostí jsou zde uvedeny i vypočtené časy pomocí obou způsobů uvedených v kapitole 4 vycházející charakteristik fluidace. Rychlost 1 odpovídá materiálu o rozměrech 0,75 x 2 x 4 mm, rychlost 2 odpovídá rozměrům 1 x 3 x 6 mm, rychlost 3 odpovídá rozměrům 1,25 x 4 x 9 mm, rychlost 4 odpovídá rozměrům 1,5 x 6 x 12,5 mm a rychlost 5 odpovídá rozměrům 2 x 8 x 16. Čas označený $t_{suš,1}$ odpovídá výpočtu dle rovnic (4.53) až (4.62) a čas $t_{suš,2}$ odpovídá výpočtu dle rovnice (4.63). Jelikož se hodnoty objemu materiálů lišily velmi málo (v řádech tisícín m^3), čas $t_{suš,2}$ vyšel po zaokrouhlení pro všechny uvažované rychlosti totožný. Pro zvolený čas t musí platit, že $t_{suš,1} < t < t_{suš,2}$. Aby bylo možné mezi sebou varianty porovnat, byl všude zvolen totožný čas 360 s. S narůstajícím časem klesá potřebný průtok a teplota vzduchu před vstupem do sušárny. Podmínkou zde byla teplota v sušárně po vypařování vody z materiálu T_3' , která musela být větší nebo rovna 50,5 °C pro zachování fyzikální smysluplnosti modelu a zachování určité rezervy od 50 °C. Dalším kritériem byla teplota T_2 , která by měla být větší než 120 °C pro zachování dostatečné teploty vzduchu před vstupem do sušárny a zároveň menší než 190 °C z hlediska bezpečnosti. Pomocí

změny relativní vlhkosti ve větvi 3 a recirkulačního parametru R bylo dosaženo totožného celkového hmotnostního toku, který byl požadován z fluidních charakteristik. Pro možné porovnání výsledků byla zvolena teplota výstupního vzduchu T_3 na 50 °C jakožto výsledek optimalizace z kapitoly 6.1.

Tabulka 21: Výsledné hodnoty optimalizace

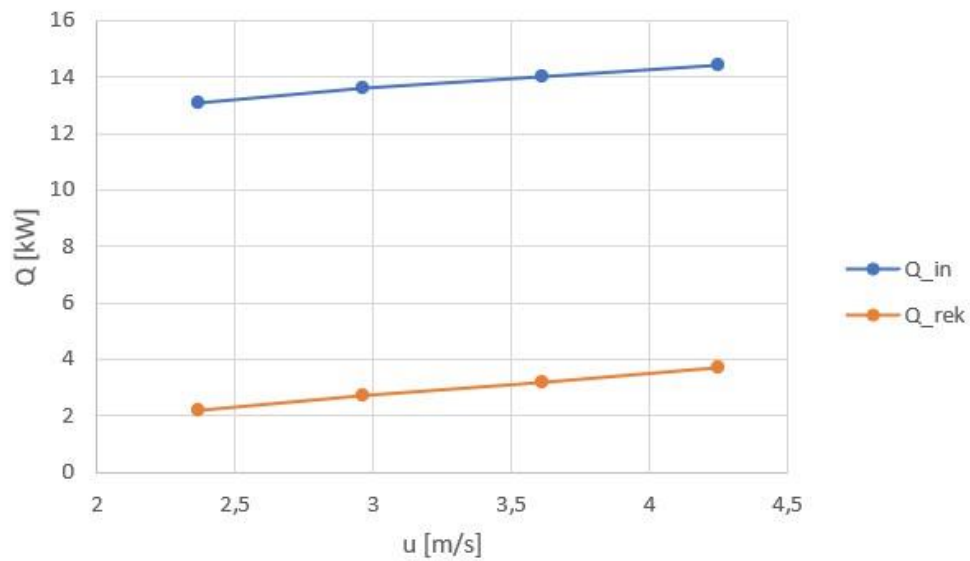
	Rychlost 1	Rychlost 2	Rychlost 3	Rychlost 4	Rychlost 5
$u_{pr} [m \cdot s^{-1}]$	0,57	0,79	0,99	1,20	1,42
$u_{fv} [m \cdot s^{-1}]$	1,72	2,37	2,96	3,61	4,25
$u_{ul} [m \cdot s^{-1}]$	3,00	3,57	3,74	3,77	4,27
$t_{suš,1} [s]$	36	49	68	94	140
$t_{suš,2} [s]$	10395	10395	10395	10395	10395
$t [s]$	430	360	360	360	360
$\varphi_3 [\%]$	84	84	76	69	64
$Q_{in} [kW]$	9,5	13,1	13,6	14,0	14,4
$T_2 [^{\circ}C]$	173,1	173,7	150,9	134,1	122,1
$R [\%]$	1,42	0,93	5,37	7,87	13,55
$T_3 [^{\circ}C]$	50,5	50,6	50,5	50,7	50,8
$Q_{rek} [kW]$	1,6	2,2	2,7	3,2	3,7
$S_{rek} [m^2]$	0,72	1,00	1,19	1,42	1,63

Jako výstup z optimalizace byly vytvořeny grafy nacházející se na Obrázcích 60 až 66. Na Obrázku 60 je graficky zobrazena závislost výstupní relativní vlhkosti na rychlosti fluidace.



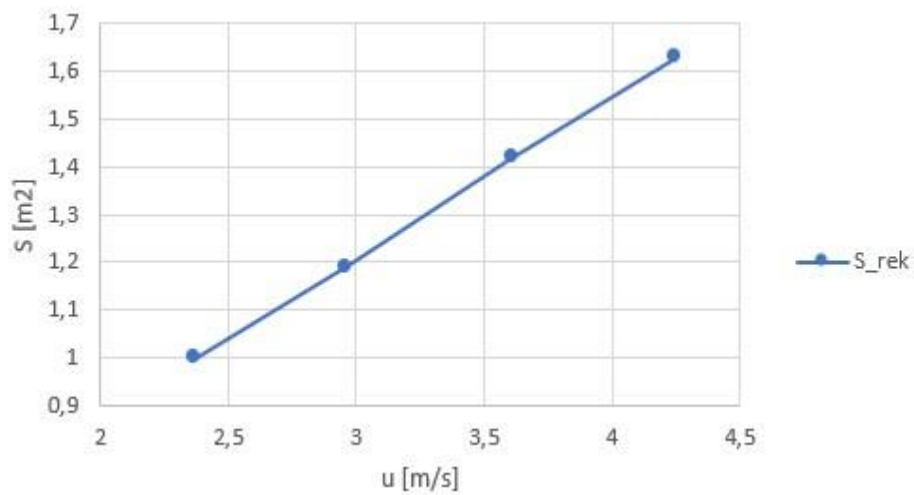
Obrázek 60: Závislost φ_3 na u

Na Obrázku 61 je graficky zobrazena závislost požadovaného tepelného výkonu a rekuperovaného tepelného výkonu na rychlosti fluidace.



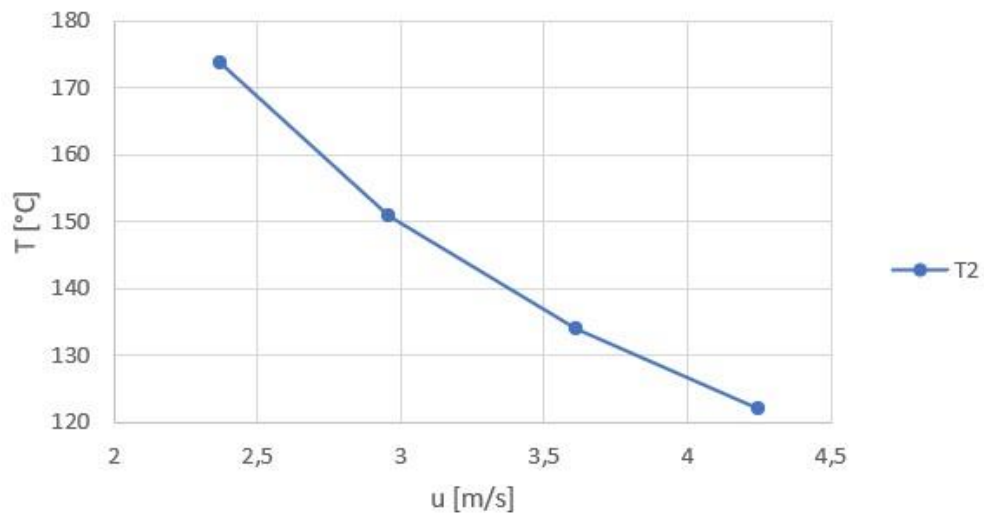
Obrázek 61: Závislost Q_{in} a Q_{rek} na u

Na Obrázku 62 je graficky zobrazena závislost velikosti teplosměnné plochy rekuperačního výměníku na rychlosti fluidace.



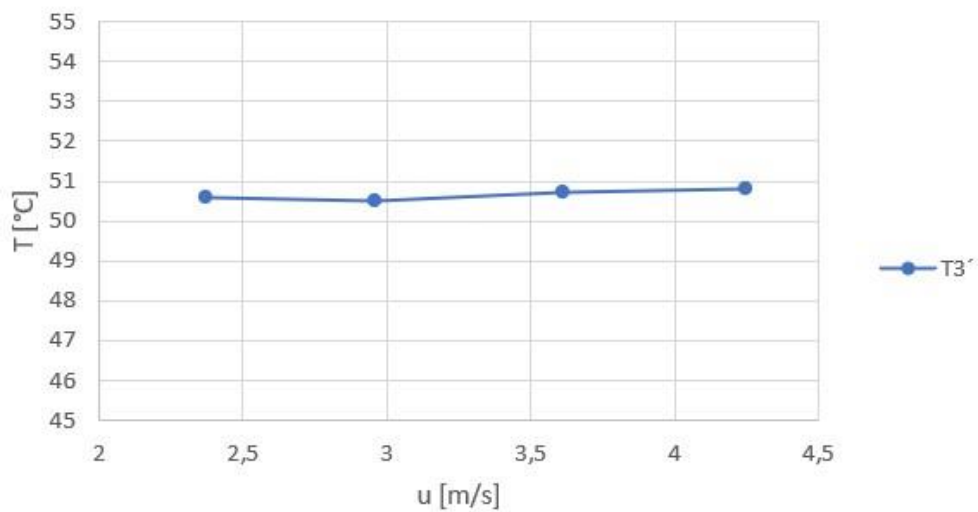
Obrázek 62: Závislost S_{rek} na u

Na Obrázku 63 je graficky zobrazena závislost teploty na vstupu do sušárny na rychlosti fluidace.



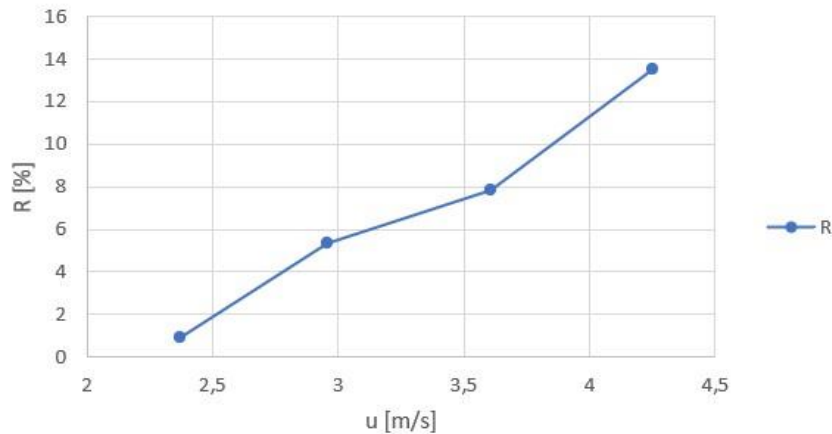
Obrázek 63: Závislost T_2 na u

Na Obrázku 64 je graficky zobrazena závislost teploty vzduchu po dokončené fázi vypařování vody z materiálu na rychlosti fluidace. Jak je z grafu patrné, tato teplota je pro všechny uvažované rychlosti téměř totožná.



Obrázek 64: Závislost T_3' na u

Na Obrázku 65 je graficky zobrazena závislost požadavku na recirkulaci vzduchu z výstupu sušárny na rychlosti fluidace.



Obrázek 65: Závislost R na u

Jak je z grafů na Obrázcích 60 až 65 patrné, se snižující se výstupní relativní vlhkostí vzduchu se zvyšují požadavky na celkový průtok a především na přivedený tepelný výkon. Množství rekuperovaného tepla roste s celkovým tepelným výkonem dodaným do zařízení a adekvátně roste také potřebná teplosměnná plocha rekuperačního výměníku. Tyto trendy funkcí jsou fyzikálně smysluplné a lze je hodnotit jako správně zpracované. Z grafu závislosti T_3' na fluidační rychlosti u_f , zobrazeném na Obrázku 64 je zřejmé, že optimální nastavení fluidní sušárny nemá téměř žádný vliv na tuto teplotu, která je pro všechny zpracované rychlosti velmi podobná. Teplota T_2 na vstupu do sušárny se ze zvyšující se fluidní rychlosti snižuje.

Se zde uvedených výstupů lze konstatovat, že optimální řešení z hlediska přiváděného tepelného výkonu, velikosti potřebné teplosměnné plochy rekuperačního výměníku, požadavku na recirkulovaný vzduch je pro co nejmenší fluidní rychlosti. Naopak z hlediska bezpečnosti provozu a pro snížení rizika samovolného vznícení sušeného materiálu je optimální rychlost co nejvyšší. Optimální řešení musí zahrnovat veškeré výše uvedené aspekty a mělo by být výsledkem ekonomicko-rizikové analýzy, která by měla zhodnotit ekonomické náklady spojené s vyššími tepelnými nároky a větším rekuperačním výměníkem spolu s možným rizikem samovolného vznícení sušeného materiálu.

7 Závěr

V této diplomové práci byla nejdříve zpracována rešerše typů sušáren vhodných pro biomasu a popis procesu sušení. Následně byla věnována pozornost popisu procesu fluidace a hlavních typů fluidních sušáren., kde byly zdůrazněny výhody i nevýhody fluidního sušení.

Pro praktickou část práce byl nejprve vytvořen bilanční model fluidní sušárny dle zadaného schématu v programu MS Excel, kde byl využíván doplněk Coolprop pro určování stahových veličin. Nejdříve byl vytvořen jednoduchý model, ke kterému se vzápětí připojila možnost recirkulace vzduchu z výstupu sušárny do směřovacího uzlu, kde se tento vzduch mísí se vzduchem z okolí a tato směs následně proudí do sušárny. Po začlenění recirkulace byla přidána i možnost rekuperace odchozího vzduchu ze sušárny pomocí rekuperačního výměníku, který predehřívá vzduch nasávaný z okolí. Kromě úspory tepelného výkonu, který je nutný do sušárny přivést se tímto krokem razantně zvýšila možnost regulace recirkulačního parametru, který určuje množství vzduchu pro recirkulaci. Nutnou podmínkou pro co nejlepší funkčnost systému byla maximální možná přípustná relativní vlhkost vzduchu za směšovacím uzlem 99,5 %.

Po dokončení bilančního modelu fluidní sušárny se provedla série experimentů s dřevní štěpkou z olše o dvou rozměrech částic a buku o třech rozměrech částic. Celkem proběhlo pět měření materiálu na experimentálním zařízení a jedno měření naprázdno, aby bylo možné výsledná data zpracovat. Výstupem ze zpracování dat jsou grafy závislosti tlakových ztrát na rychlosti proudění vzduchu uvnitř zařízení při měření. Jelikož se jedná o těžko fluidovatelné materiály, nastala fluidace jen u menších částic a u olšového dřeva proběhla fluidace z části také u větších částic. Tento fakt je způsoben především tím, že olšové dřevo má menší hustotu než bukové a stejně velká částice je tedy lehčí. Výsledné grafy byly porovnány s pořízenými fotografiemi během měření a bylo konstatováno, že výsledky vyjádřené z grafů se ztotožňují se zachycením materiálů na fotografiích.

Posledním cílem této práce byla optimalizace provozních parametrů fluidní sušárny se začleněním zhodnocení přínosu rekuperace tepla. Optimalizace byla nejdříve provedena pro jeden konkrétní zvolený materiál, kterým byla zvolena olšová štěpka o rozměrech 1 x 3 x 6 mm. Pro tento materiál jsou optimální hodnoty následující: teplota na výstupu ze sušárny $T_3 = 50 \text{ °C}$, relativní vlhkost vzduchu a výstupu ze sušárny $\varphi_3 = 84 \text{ %}$, přivedený tepelný výkon $Q_{in} = 13,1 \text{ kW}$, teplota před sušárnou $T_2 = 173,7 \text{ °C}$, recirkulační parametr $R = 0,93 \text{ %}$, teplota vzduchu po dokončené fázi vypařování vody z materiálu $T_3' = 50,6 \text{ °C}$, tepelný výkon rekuperačního výměníku $Q_{rek} = 2,2 \text{ kW}$ s velikostí teplosměnné plochy $S_{rek} = 1 \text{ m}^2$. Přínos rekuperace tepla spočívá jak v úspoře tepla, které je nutné do systému přivádět, tak v rozšíření regulačního pole recirkulační větve. Příznivý efekt se zavedením recirkulace je dosažení výhodnějších parametrů po optimalizaci při totožných vstupních podmínkách.

Citace použité literatury byly prováděny dle normy ČSN ISO 690. Pro tvorbu vlastních obrázků byla použita studentská verze programu AutoCAD 2018.

8 Seznam použitých zdrojů a literatury

- [1] BECHNÍK, Bronislav. Biomasa - definice a členění. In: *Tzbinfo* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/biomasa/5641-biomasa-definice-a-cleneni>
- [2] ČSN EN ISO 16559. *Tuhá biopaliva: Terminologie, definice a popis*. 2015.
- [3] OCHODEK, Tadeáš, Jan KOLONIČNÝ a Pavel JANÁSEK. *Potenciál biomasy, druhy, bilance a vlastnosti paliv z biomasy* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <http://www.biomasa-info.cz/cs/doc/prirucka1.pdf>. Metodická příručka ke studii. VŠB - Technická univerzita Ostrava.
- [4] HORÁK, Jiří, Kamil KRPEC a Lubomír MARTINÍK. Jak si doma stanovit vlhkost a výhřevnost dřeva?. In: *Tzbinfo* [online]. c2001-2022 [cit. 2022-05-30]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/9300-jak-si-doma-stanovit-vlhkost-a-vyhrevnost-dreva>
- [5] DLOUHÝ, Tomáš. *Spalování a kotle* [online]. 2019 [cit. 2022-05-30]. Dostupné z: <http://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/SK-pr1.pdf>
- [6] VALENTA, Vladimír. Využití biomasy pro výrobu tepla. *Topenářství instalace* [online]. 2012(4) [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.topin.cz/clanky/cech-topenaru-a-instalateru-cr-informuje-vyuziti-biomasy-pro-vyrobu-tepla-2-cast-detail-9957>
- [7] KUNII, Daizo a Octave LEVENSPIEL. *Fluidization Engineering*. Second edition. Butterworth-Heinemann, 1991. ISBN 978-0-08-050664-7.
- [8] HAVLÍK, Jan a Tomáš DLOUHÝ. Sušení biomasy pro energetické využití. ŠPILÁČEK, Michal, Marian BRÁZDIL, Petr KRACÍK a Michaela ZÁRYBNICKÁ. *Energie z biomasy XIV: Sborník přednášek z konference Energie z biomasy XIV* [online]. První. Vysoké učení technické v Brně, 2013, s. 19-22 [cit. 2022-05-15]. ISBN 978-80-214-4775-2. Dostupné z: https://eu.fme.vutbr.cz/file/Sbornik-EnBio/2013/04_Havlik.pdf
- [9] STUDNIČKOVÁ, Renata. Sušení biomasy pro energetické účely. *Biom.cz* [online]. [cit. 2022-05-15]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/suseni-biomasy-pro-energeticke-ucely>
- [10] ZÁRYBNICKÁ, Michaela. *Návrh sušky na biomasu*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Marek Baláš.
- [11] *Sušení textilu* [online]. In: . [cit. 2022-06-02]. Dostupné z: <http://mytextilenotes.blogspot.com/2012/08/textile-drying.html>
- [12] JIROUT, Tomáš. *PRŮMYSLOVÉ PROCESY: Přenos tepla III, Sušárny* [online]. [cit. 2022-05-30]. Dostupné z: http://users.fsid.cvut.cz/~jiroutom/ujep_soubory/PP_PT_3.pdf
- [13] DVOŘÁČEK, Tomáš. Využití univerzální šnekové sesypné sušárny BCS – 1. *Biom.cz* [online]. [cit. 2022-05-15]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-univerzalni-snekove-sesypne-susarny-bcs-1>

- [14] Nízkoteplotní fluidní sušárna typu FDS. In: *Centrivit* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <http://www.centrivit.cz/cz/nizkoteplotni-fluidni-susarna-fds/>
- [15] Vakuové rotační sušárny. In: *MIX, spol. s r. o.* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <http://www.mixbrno.cz/nase-sluzby/vakuove-rotacni-susarny/21>
- [16] Bubnové sušičky SPB. In: *Strazar pellet* [online]. 2021 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.strazarpellet.com/bubnove-susicky>
- [17] Pásová sušička AGRO SPP12M. In: *Strazar pellet* [online]. 2021 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.strazarpellet.com/pasove-susarny>
- [18] Pásová sušička BD12. In: *Segopal tech s.r.o.* [online]. 2016 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: http://www.segopaltech.cz/cs_CZ/pasova-susicka/
- [19] Bubnová sušárna typu. In: *Centrivit* [online]. 2013 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <http://www.centrivit.cz/cz/bubnova-susarna-dds/>
- [20] Sušárny. In: *Brikliis* [online]. 2021 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://brikliis.cz/spalitelne-odpady/susarny/>
- [21] Bubnová sušárna typu. In: *Centrivit* [online]. 2013 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <http://www.centrivit.cz/cz/bubnova-susarna-dds/>
- [22] ČERNÝ, Robert. Sušení. In: *DOCPLAYER* [online]. 2016 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/16137629-12-suseni-obr-12-1-kapilarni-elevace.html>
- [23] SCHREIBEROVÁ, Lenka. *Fluidace* [online]. c2012-2022 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <http://uchi-old.vscht.cz/uploads/pedagogika/labchi/Fl.pdf>. VŠCHT Praha.
- [24] JIROUT, Tomáš. *Hydromechanické procesy: Průtok porézní vrstvou* [online]. [cit. 2022-05-30]. Dostupné z: http://users.fsid.cvut.cz/~jiroutom/vyuka/hmp/hmp_soubory/hmp4_1.pdf
- [25] NOVOTNÝ, Pavel. *Fluidní sušení*. Liberec, 1996. Diplomová práce. Technická univerzita Liberec, Fakulta strojní. Vedoucí práce Josef Olehla.
- [26] SKOPEC, Pavel, Jiří ŠTEFANICA a Jan HRDLIČKA. VÝBĚR INERTNÍCH MATERIÁLŮ PRO FLUIDNÍ SPALOVÁNÍ BIOMASY. ŠPILÁČEK, Michal a Martin LISÝ. *ENERGIE Z BIOMASY XIII: Sborník příspěvků z odborné konference* [online]. První. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012, s. 121-126 [cit. 2022-05-30]. ISBN 978-80-214-4685-4. Dostupné z: https://eu.fme.vutbr.cz/file/Sbornik-EnBio/2012/14_SKOPEC.pdf
- [27] *Určení prahové rychlosti fluidace* [online]. [cit. 2022-05-30]. Dostupné z: http://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/C_fluidace-2.pdf
- [28] MUJUMDAR, Arun S. *Handbook of industrial drying*. Third edition. CRC Press, 2006. ISBN 1574446681.
- [29] Prandtl číslo - Prandtl number. In: *ENCYKLOPEDIA* [online]. <https://wikijii.com/> [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: https://wikijii.com/wiki/Prandtl_number
- [30] OBJEMOVÁ HMOTNOST DŘEVA. In: *Naše stromy* [online]. 2022 [cit. 2022-06-02]. Dostupné z: <http://www.nasestromy.cz/objemova-hmotnost-dreva/>

- [31] Tepelné výměníky - koeficienty přenosu tepla: Celkové součinitele prostupu tepla v běžných provedeních výměníků - trubkové, deskové nebo spirálové. In: *The Engineering ToolBox* [online]. [cit. 2022-05-29]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/heat-transfer-coefficients-exchangers-d_450.html
- [32] Hodnoty vody a vzduchu pro výpočet přestupu tepla. In: *Tzbinfo* [online]. c2001-2022 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/55-hodnoty-vody-a-vzduchu-pro-vypocet-prestupu-tepla>
- [33] Hmotnost dřeva. In: *Dřevostavitel: dřevostavby a bydlení* [online]. [cit. 2022-05-21]. Dostupné z: <https://www.drevostavitel.cz/nastroj/hmotnost-dreva>
- [34] HEŘMÁNKOVÁ, Věra, Ondřej ANTON a Tereza KOMÁRKOVÁ. Závislost fyzikálních a mechanických vlastností konstrukčního smrkového dřeva na vlhkosti. In: *Tzbinfo* [online]. c2001-2022 [cit. 2022-05-21]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/drevene-konstrukce/16872-zavislost-fyzikalnich-a-mechanickych-vlastnosti-konstrukcniho-smrkoveho-dreva-na-vlhkosti>
- [35] JIROUT, Tomáš. *HYDROMECHANICKÉ PROCESY: Fluidace* [online]. [cit. 2022-05-30]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/~jiroutom/vyuka/hmp/hmp_soubory/hmp9.pdf

Seznam obrázků

Obrázek 1: Vliv vlhkosti řepných řízků na výhřevnost a spalné teplo [6]	- 12 -
Obrázek 2: Fluidní sušárna – parametry sušícího média a sušeného materiálu	- 14 -
Obrázek 3: Sušící křivka [11].....	- 16 -
Obrázek 4: Šneková sesypná sušárna [13]	- 17 -
Obrázek 5: Nízkooteplotní fluidní sušárna typu FDS [14].....	- 17 -
Obrázek 6: Vakuová rotační sušárna [15]	- 17 -
Obrázek 7: Schéma bubnové sušárny [16]	- 18 -
Obrázek 8: Pásová sušárna [17]	- 18 -
Obrázek 9: Průběh fluidace [7]	- 20 -
Obrázek 10: Geldartův diagram [7].....	- 21 -
Obrázek 11: Závislost tlakové ztráty fluidní vrstvy na rychlosti [28].....	- 24 -
Obrázek 12: Rovnoměrná fluidní vrstva [7].....	- 24 -
Obrázek 13: Bublající fluidní vrstva [7].....	- 25 -
Obrázek 14: Pístová fluidní vrstva [7]	- 25 -
Obrázek 15: Kanálková fluidní vrstva [35].....	- 25 -
Obrázek 16: Turbulentní fluidace [7] [35]	- 26 -
Obrázek 17: Schéma pro optimalizaci fluidní sušárny	- 28 -
Obrázek 18: Zadané schéma fluidní sušárny	- 29 -
Obrázek 19: Zadaná fluidní sušárna 3D model	- 30 -
Obrázek 20: Snímek obrazovky z výpočtového prostředí.....	- 31 -
Obrázek 21: Schéma systému bez recirkulace a rekuperace vzduchu	- 35 -
Obrázek 22: Schéma systému s recirkulací bez rekuperace	- 37 -
Obrázek 23: Schéma systému s recirkulací a s rekuperací.....	- 39 -
Obrázek 24: QT diagram rekuperátoru	- 40 -
Obrázek 25: Schéma laboratorního zařízení	- 45 -
Obrázek 26: Olše1	- 48 -
Obrázek 27: Olše3	- 48 -
Obrázek 28: Buk1	- 48 -
Obrázek 29: Buk2.....	- 48 -
Obrázek 30: Buk3.....	- 48 -
Obrázek 31: Závislost ρs na W pro olši a buk	- 50 -
Obrázek 32: Závislost hustoty smrkového dřeva na vlhkosti [34].....	- 51 -
Obrázek 33: Graf závislosti hustoty olše a buku na W	- 51 -
Obrázek 34: Graf $dp = f(u)$ pro distributor	- 53 -
Obrázek 35: Olše1 při u_{MAX}	- 55 -
Obrázek 36: Stav po fluidaci olše1.....	- 55 -
Obrázek 37: Vliv rychlosti proudění na Δp – olše1	- 55 -
Obrázek 38: Olše3 při u_{MAX}	- 56 -
Obrázek 39: Stav po fluidaci olše3.....	- 56 -
Obrázek 40: Vliv rychlosti proudění na Δp – olše3	- 56 -
Obrázek 41: Buk1 při u_{MAX}	- 57 -
Obrázek 42: Stav po fluidaci buk1	- 57 -
Obrázek 43: Vliv rychlosti proudění na Δp – buk1	- 57 -
Obrázek 44: Buk2 při u_{MAX}	- 58 -
Obrázek 45: Stav po fluidaci buk2	- 58 -
Obrázek 46: Vliv rychlosti proudění na Δp – buk2.....	- 58 -
Obrázek 47: Buk3 při u_{MAX}	- 59 -
Obrázek 48: Stav po fluidaci buk3	- 59 -
Obrázek 49: Vliv rychlosti proudění na Δp – buk3.....	- 59 -

Obrázek 50: Převzatý graf ze školní laboratorní úlohy	- 60 -
Obrázek 51: Pracovní schéma pro optimalizaci	- 61 -
Obrázek 52: Schéma postupu optimalizace.....	- 61 -
Obrázek 53: Závislost Q_{in} na φ_3	- 62 -
Obrázek 54: Závislost T_2 na φ_3	- 63 -
Obrázek 55: Závislost R na φ_3	- 63 -
Obrázek 56: Závislost T_3' na φ_3	- 64 -
Obrázek 57: Závislost Q_{rek} na φ_3	- 64 -
Obrázek 58: Závislost S_{rek} na φ_3	- 65 -
Obrázek 59: Schéma postupu optimalizace.....	- 67 -
Obrázek 60: Závislost φ_3 na u	- 68 -
Obrázek 61: Závislost Q_{in} a Q_{rek} na u	- 69 -
Obrázek 62: Závislost S_{rek} na u	- 69 -
Obrázek 63: Závislost T_2 na u	- 70 -
Obrázek 64: Závislost T_3' na u	- 70 -
Obrázek 65: Závislost R na u	- 71 -

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1: Porovnání sušáren</i> [19] [20] [21] [22].....	- 19 -
Tabulka 2: Charakteristické rozměry pro fluidní sušárnu	- 30 -
Tabulka 3: Okrajové podmínky pro vzduch.....	- 32 -
Tabulka 4: Okrajové podmínky pro sušený materiál	- 32 -
Tabulka 5: Okrajové podmínky v jednotlivých uzlech modelu	- 32 -
Tabulka 6: Výsledné hodnoty abs. vlhkosti a entalpie vzduchu v uzlech 1 a 3	- 36 -
Tabulka 7: Hodnoty větve 1 při R_{max}	- 39 -
Tabulka 8: Teploty a entalpie ve větvích 0rek a 6	- 40 -
Tabulka 9: Změněné hodnoty při vsázkovém režimu	- 44 -
Tabulka 10: Rozměry částic pro materiál olše1	- 46 -
Tabulka 11: Rozměry částic pro materiál olše3	- 46 -
Tabulka 12: Rozměry částic pro materiál buk1	- 47 -
Tabulka 13: Rozměry částic pro materiál buk2.....	- 47 -
Tabulka 14: Rozměry částic pro materiál buk3.....	- 47 -
Tabulka 15: Naměřené hmotnosti a výšky vrstvy vsázek	- 49 -
Tabulka 16: Výsledné hodnoty sypné hmotnosti, hustoty a mezerovitosti	- 52 -
Tabulka 17: Výsledné hodnoty veličin pro dílčí výpočty experimentu	- 52 -
Tabulka 18: Reynoldsovo číslo, mezivýpočty a prahová rychlost fluidace	- 53 -
Tabulka 19: Hodnoty pro vybranou optimální variantu.....	- 65 -
Tabulka 20: Hodnoty pro optimální variantu bez rekuperace tepla	- 66 -
Tabulka 21: Výsledné hodnoty optimalizace	- 68 -