ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA
STROJNÍ

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

2020

LUKÁŠ
STRNÁDEK

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Strnádek** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **438281**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**

Studijní program: **Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Energetika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Fluidní sušení biomasy**

Název diplomové práce anglicky:

**Fluidized bed drying for biomass**

Pokyny pro vypracování:

Zhodnoťte možnosti fluidního sušení a navrhněte vhodnou koncepci fluidní sušky pro různé druhy biomasy.
Práce bude obsahovat:
1. Zpracování rešerše typů sušek a popis procesu sušení.
2. Popis procesu fluidace a rozdělení fluidních sušek pro různé typy sušených materiálů.
3. Provedení sady experimentů s fluidací různých materiálů, vyhodnocení a následné porovnání experimentálních a teoreticky vypočítaných výsledků fluidačních charakteristik.
4. Doporučení a základní koncepční návrh pro fluidní sušku pro různé druhy biomasy.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **22.04.2020** Termín odevzdání diplomové práce: **26.06.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2021**

| Ing. Jan Havlík, Ph.D.<br>podpis vedoucí(ho) práce | podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry | prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.<br>podpis děkana(ky) |
|---|---|---|

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

| 23.6.2020<br>Datum převzetí zadání | Strnádek<br>Podpis studenta |
|---|---|



© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

# Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne

Lukáš Strnádek

# Anotační list

| | |
|---|---|
| **Jméno autora** | Bc. Lukáš Strnádek |
| **Název BP/DP** | Fluidní sušení biomasy |
| **Anglický název:** | Fluidized bed drying for biomass |
| **Akademický rok:** | 2019/2020 |
| **Ústav/Odbor:** | Ústav energetiky |
| **Vedoucí BP/DP:** | Ing. Jan Havlík, Ph.D. |
| **Konzultant:** | - |
| **Bibliografické údaje:** | Počet stran: 87 |
| | Počet obrázků: 102 |
| | Počet tabulek: 12 |
| | Počet příloh: 4 |
| **Klíčová slova:** | sušení, fluidace, fluidní sušení, biomasa |
| **Keyword:** | drying, fluidization, fluidized bed drying, biomass |


**Anotace:** Tato diplomová práce se zabývá fluidním sušením. Popisuje typy sušek a vysvětluje problém sušení a sušení ve fluidní vrstvě. Další část popisuje různé typy fluidních sušáren. V experimentální části jsou vyhodnoceny fluidní charakteristiky měřených materiálů a teoretické vyhodnocení fluidních charakteristik pro vybrané materiály z biomasy. Nakonec je navržena nejvhodnější metoda pro fluidní sušení biomasy.

**Abstract:** This diploma thesis deals with the concept of fluidized bed drying. It describes the types of dryers and the problem of drying and fluidized bed drying. Next part describes different types of fluidized dryers. In the experimental part, the fluidization characteristics for the measured materials and the theoretical evaluation of the fluidization characteristics for selected biomass materials are evaluated. Finally, the most suitable method of fluidized drying for biomass is proposed.

# Poděkování

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Janu Havlíkovi, Ph.D. za vedení mé diplomové práce, za pomoc, cenné rady, připomínky a ochotu při řešení všech problémů týkajících se zpracování této práce.

# Obsah

Seznam symbolů ..... 3
1 Úvod ..... 5
2 Sušárny ..... 6
2.1 Typy sušáren ..... 6
2.2 Sušení ..... 13
3 Fluidní sušení ..... 17
3.1 Úvod ..... 17
3.2 Vlastnosti částic ..... 18
3.3 Vlastnosti fluidní vrstvy ..... 19
3.4 Sušení fluidovaných částic ..... 23
3.5 Fluidní sušárny ..... 24
3.6 Konstrukční prvky fluidních sušáren ..... 25
3.7 Zdroje tepla ..... 29
3.8 Kontinuální fluidní sušky ..... 30
3.9 Stacionární fluidní sušky ..... 31
3.10 Vibrující fluidní sušky ..... 34
3.11 Různé fluidní sušky ..... 39
3.12 Návrh fluidní sušky ..... 43
4 Fluidace materiálu, experiment ..... 51
4.1 Popis zařízení ..... 51
4.2 Postup a vyhodnocení měření ..... 51
4.3 Teoretické vyhodnocení ..... 55
4.4 Výsledky teoretického výpočtu s porovnáním výsledků z experimentu ..... 57
4.5 Měřené materiály v diagramu Geldartových skupin ..... 59
5 Volba správného typu fluidní sušky pro daný materiál ..... 60
5.1 Popis jednotlivých materiálů ..... 61
5.2 Výpočet pro vybrané materiály biomasy ..... 65
5.3 Zhodnocení vhodnosti typu fluidní sušky pro daný materiál ..... 69
5.4 Koncepční návrh vibrofluidní sušky pro biomasu ..... 70
6 Závěr ..... 72
7 Použitá literatura ..... 73
8 Přílohy ..... 76
8.1 Vyhodnocení měření pro 3,1 kg materiálu ..... 76

8.2 Vyhodnocení měření pro 2,7 l materiálu ..... 79
8.3 Teoretické vyhodnocení tlakové ztráty fluidní vrstvy pro vybrané materiály biomasy ... 81
8.4 Keramzity Liapor..... 87

# Seznam symbolů

| symbol | význam | jednotka |
|---|---|---|
| $a$ | polovina amplitudy vibrací | m |
| $A_t$ | průřez komorou | $m^2$ |
| $Ar$ | Archimedovo číslo | $-$ |
| $C, C_e, C_p^*$ | koncentrace par ve vzduchu, na výstupu, v rovnováze s koncentrací na povrchu částice | $-$ |
| $C_p, C_{pA} = C_{pg}, C_{pv}$ | měrná tepelná kapacita, suchého vzduchu, vodní páry | $J/kgK$ |
| $d, d_p$ | průměr, střední průměr | $m$ |
| $E$ | rozsah doby zdržení | $s^{-1}$ |
| $F, F_0, F_1$ | hmotnostní průtok, vstupujícího materiálu, protékaného materiálu | $kg/s$ |
| $g$ | gravitační konstanta | $m/s^2$ |
| $h, h_A, h_{A0}, h_{A1}, h_{S0}, h_{S1}$ | entalpie, vlhkého vzduchu, vstupujícího vzduchu, vystupujícího vzduchu, vstupujícího materiálu, vystupujícího materiálu | $J/kg$ |
| $h_p$ | koeficient přestupu tepla mezi plynem a částicí | $W/m^2K$ |
| $H, H_0, H_m = L_m$ | výška fluidní vrstvy, při prahové fluidaci, za klidu | $m$ |
| $k_d$ | koeficient přenosu hmoty | m/$s$ |
| $m = W$ | hmotnost | $m$ |
| $\dot{M}, \dot{M}_A, \dot{M}_S$ | hmotnostní průtok, vzduchu, materiálu | kg/s |
| $p, p^{''}, p_A, p_A^{''}(T_{dp})$ | tlak, par, suchého vzduchu, par při teplotě rosného bodu | Pa |
| $\Delta p, \Delta p_0 = \Delta P_0, \Delta p_c, \Delta p_d$ | tlaková ztráta fluidní vrstvy, při prahové fluidaci, celková, distributoru | $Pa$ |
| $q, q_1, q_h$ | měrné teplo, tepelné ztráty, přivedené | $J/kg$ |
| $Q, Q_0, Q_{cr}, Q_f, Q_m, Q^*$ | měrná vlhkost, vstupujícího materiálu, kritická, volná, v závislosti na vzdálenosti od středu částice, na povrchu částice v rovnováze se sušícím vzduchem | $-$ |
| $\dot{Q}$ | tepelný výkon | $W$ |
| $r$ | vzdálenost od středu částice | $m$ |
| $R$ | poloměr | $m$ |
| $Re, Re_0$ | Reynoldsovo číslo, při prahové fluidaci | $-$ |

| | | |
|---|---|---|
| $S$ | povrch částice | $m^2$ |
| $t$ | čas | $s$ |
| $\bar{t}$ | průměrná doba zdržení | $s$ |
| $T, T_A = T_{gi}, T_{dp}, T_{wb}, T_e, T_p$ | teplota, vstupujícího vzduchu, rosného bodu, mokrého teploměru, vystupujícího vzduchu, částice | $K, °C$ |
| $u, u_0, u_{mf}$ | rychlost, vstupujícího vzduchu, prahová rychlost fluidace | $m/s$ |
| $U, U_0, U_t$ | rychlost, prahová rychlost fluidace, úletu | $m/s$ |
| $\dot{V}$ | objemový průtok | $m^3/s$ |
| $x$ | délka | $m$ |
| $X, X_A, X_{A0}, X_{A1}, X_K, X_R, X_S, X_{S0}, X_{S1}$ | měrná vlhkost, vzduchu, vstupujícího vzduchu, vystupujícího vzduchu, kritická, zbytková, materiálu, vstupujícího materiálu, vystupujícího materiálu | $-$ |
| $\dot{X}, \dot{X}_S, \dot{X}_{SI}$ | rychlost sušení, materiálu, mokrého vzorku | $kg/s$ |
| $X_S^*$ | bezrozměrná vlhkost materiálu | $-$ |
| $\dot{X}_S^*$ | bezrozměrná rychlost sušení | $-$ |
| $y$ | šířka | $m$ |
| $z$ | výška | $m$ |
| $\varepsilon, \varepsilon_0, \varepsilon_m$ | mezerovitost, při prahová fluidaci, za klidu | $-$ |
| η | účinnost | $-$ |
| $\kappa$ | rychlostní konstanta | $s^{-1}$ |
| $\mu$ | viskozita | $kg/ms$ |
| $\rho, \rho_g, \rho_{solid}, \rho_{sypná}$ | hustota, plynu, materiálu, sypná hmotnost | $kg/s$ |
| $\tau$ | doba zdržení pro úplné vysušení | $s$ |
| φ | relativní vlhkost | $-$ |
| $\phi$ | sféricita | $-$ |
| $\omega$ | frekvence vibrací | $Hz$ |
| $\mathcal{D}, \mathcal{D}_m$ | difuzivita | $kg/m^2 s$ |
| $\mathcal{L}$ | výparné teplo | $J/kg$ |

# 1 Úvod

Fluidní sušení je jedním z modernějších sušících způsobů, který pro své četné výhody nalézá stéle vetší uplatnění ve všech průmyslových odvětvích. Intenzita sušícího procesu fluidních sušáren dosahuje několika set kilogramů odpařené vody na 1 $m^3$ prostoru sušárny za hodinu. V tomto směru jim mohou konkurovat pouze proudové sušárny. U sušárny jiného typu je při sušení tepelně nestálých látek nutné použít sušícího vzduchu s nízkou teplotou, to u fluidních sušáren neplatí. Pokud se při sušení značně snižuje vlhkost při menších teplotách sušícího vzduchu nebo při použití vícefázových sušáren, dosáhne se vysoké tepelné účinnosti. Teplené ztráty jsou male v důsledku malého povrchu sušárny. Dobu zdržení můžeme libovolně měnit, to je výhoda oproti proudovým sušárnám, kde se doba zdržení materiálu pohybuje kolem několika sekund. Potřebná doba zdržení je zpravidla kratší v důsledku intenzivního přestupu tepla a hmoty. Na obsluhu a údržbu jsou kladeny malé nároky, neboť fluidní sušárny jsou velmi jednoduché a nemají krom ventilátoru vzduchu mechanicky pohyblivé části, samozřejmě až na speciální fluidní sušárny (vibrofluidní sušárna). Investiční náklady na fluidní sušárnu jsou ve srovnání s jinými sušárnami menší. Není zapotřebí masivních budov a základů, neboť fluidní sušárny lze budovat pod lehkými přístřešky. [5]

Fluidní sušárny mají i několik nevýhod, kterým se dá ale velmi snadno předejít. Vetší tlakovou ztrátu fluidní sušárny s cyklóny vyvážíme v příznivých případech menší spotřebou tepla. U jednostupňové průtokové fluidní sušárny nemůžeme účinně regulovat dobu zdržení částice. Mají také vetší spotřebu tepla při odpařování roztoků než při použití odparky, to můžeme vyvážit jednoduchostí zařízení, neboť nahradíme odparku a granulátor jediným fluidním zařízením. [5]

Předmětem této závěrečné práce je zhodnocení možnosti fluidního sušení biomasy. Práce je rozdělena do čtyř hlavních kapitol.

V první kapitole se zabývám procesem sušení a rozdělením různých typů sušek a následně podrobným popisem těchto druhů sušek.

Ve druhé kapitole se zabývám popisem fluidního sušení. Popisuji vlastnosti částic důležité pro fluidaci, konstrukce fluidních sušek a rozdělení různých druhů fluidních sušek. Dále jsou uvedeny vztahy pro výpočet doby zdržení částic pro vsázkové i kontinuální fluidní sušení.

Ve třetí kapitole je na základě dat získaných z měření vyhodnoceno, jaké materiály jsou vhodné pro fluidaci. Dále jsou vyhodnoceny charakteristiky vybraných druhů biomasy pro fluidaci.

V poslední kapitole se zabývám určením vhodného způsobu fluidního sušení biomasy.

# 2 Sušárny

Sušárny jsou zařízení, ve kterých se přívodem tepla odstraňuje z materiálu vlhkost vypařováním nebo sublimací. Procesy, které se při sušení odehrávají, jsou tedy kombinací přenosu tepla a přenosu hmoty. [4]

Sušárny rozdělujeme podle těchto kritérií:

- způsobu přívodu tepla: konvekcí, kondukcí, sáláním, mikrovlny
- sušícího média, do kterého se odvádí vlhkost: vzduch, spaliny, inertní plyny, vakuum
- charakteru kontaktu proudění sušícího prostředí: fluidní lože, proudové atd.
- pohybu sušeného materiálu: v klidu, mechanické, pneumatické
- provozu: kontinuální, diskontinuální. [4]

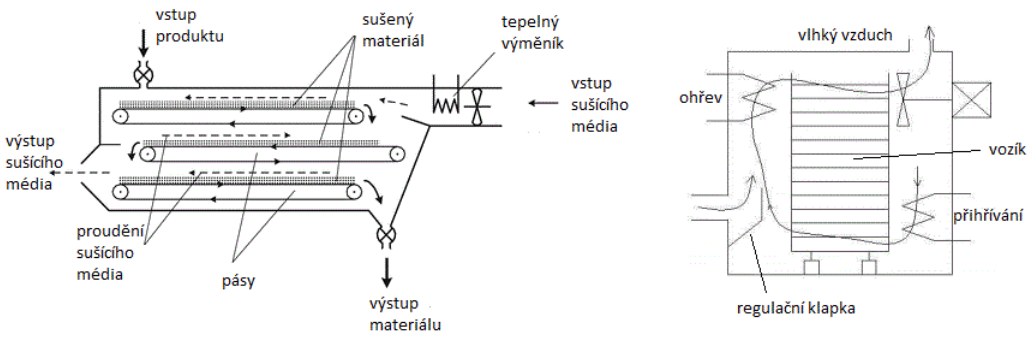
## 2.1 Typy sušáren

### 2.1.1 Konvektivní sušárny

Přenos tepla je zajišťován sušícím prostředím. U tohoto typu sušáren je možné použít recirkulaci sušícího média. [4]

#### *2.1.1.1 Ofukovaná nehybná vrstva*

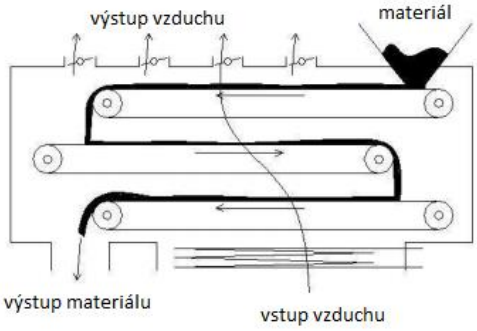
Jsou to komorové diskontinuální sušárny nebo sušárny pásové kontinuální se souproudým či protiproudým uspořádáním toku sušícího média. Jsou vhodné pro sušení, kde převládá vnitřní difúzní odpor, tj. především u kusových látek (ovoce, bobuloviny, zelenina, maso). Mají malý odpařovací výkon cca 1 kg/m$^2$.h. [4]




*Obrázek 2.1 Sušárny s ofukovanou nehybnou vrstvou [3] [7]*

#### *2.1.1.2 Profukovaná nehybná vrstva*

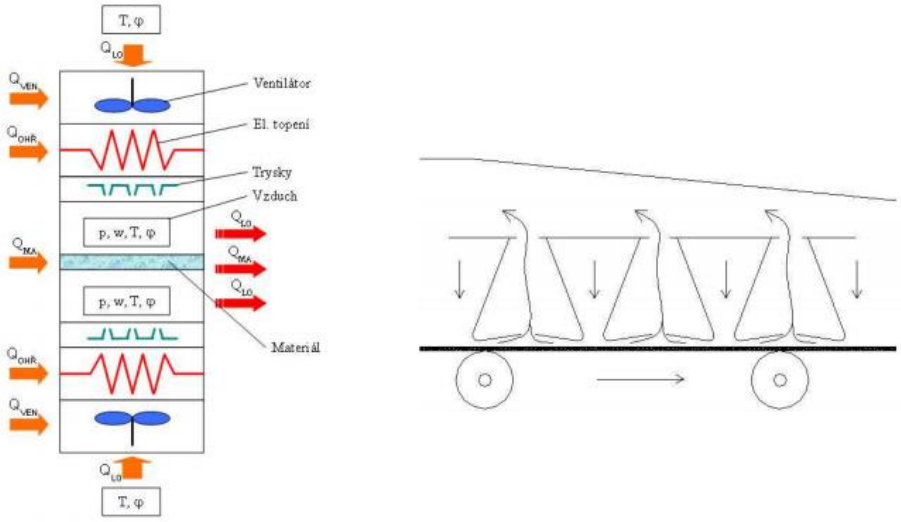
Jedná se o komorové nebo pásové kontinuální sušárny. Mají příčné proudění sušícího média. Rychlost proudění sušícího vzduchu je do 5 m/s. Jsou vhodné pro sušení hrubších zrn (obilí, granule, ovoce, zelenina). Odpařovací výkon je cca 10 až 100 kg/m$^2$.h. Spotřeba tepla je v rozmezí 4 až 5 MJ/kg. [4]




*Obrázek 2.2 Sušárna s profukovanou nehybnou vrstvou [7]*

### *2.1.1.3 Impaktní sušárny*

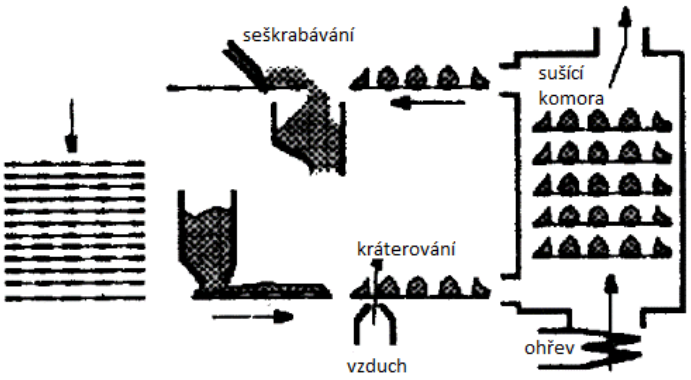
Jsou to specifické sušárny s ofukovanou vrstvou. Jde o sušení pásů, které ofukuje horký vzduch přes štěrbiny či kruhové trysky. Ofukování může být i oboustranné. Jsou vhodné pro textilie, papír, folie, filmy. [4]




*Obrázek 2.3 Impaktní sušárny [6] [7]*

### *2.1.1.4 Pěnové sušení*

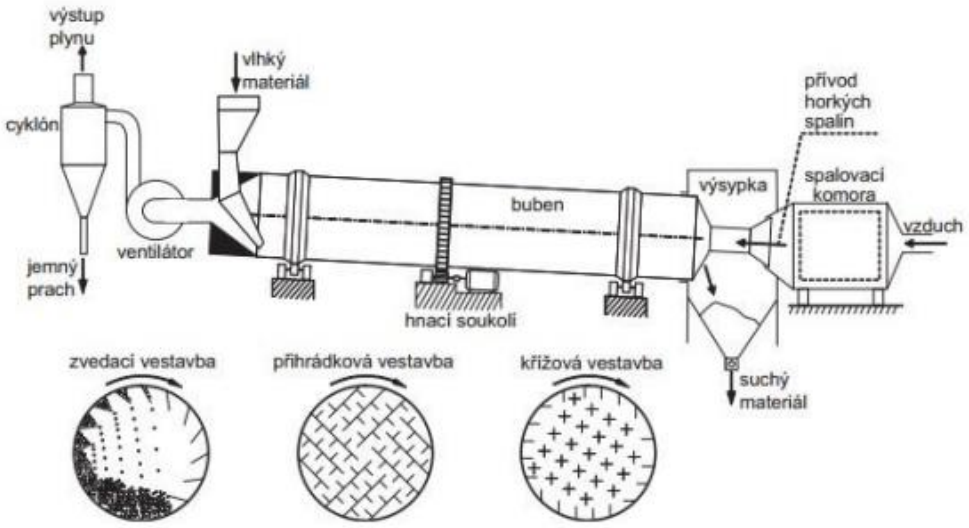
Zahuštěná šťáva se zpěňuje a nanáší na perforované desky. Profukováním vzduchem nebo dusíkem se pěny rozdělují tzv. kráterováním pro snížení oxidace. Sušení probíhá v komorové nebo tunelové sušárně. Jsou vhodné pro zeleninové i ovocné šťávy a instantní produkty. [4]




*Obrázek 2.4 Sušárna využívající pěnové sušení [4]*

### *2.1.1.5 Bubnové sušárny*

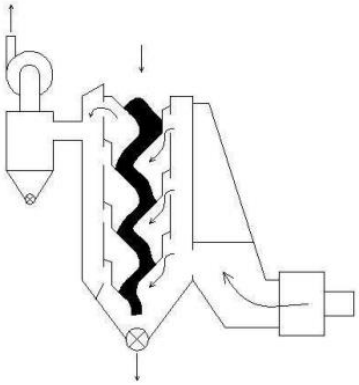
Rotující buben má vestavby, které přesypávají sušený materiál a zvyšují kontaktní plochu se sušícím médiem. Používá se souproud i protiproud. Jsou vhodné pro polydisperzní materiály (100 µm až 0,1 m) s požadavkem na delší dobu zdržení, krystalické i drobně kusové materiály (chemikálie, keramické materiály, zrněné maso). Odpařovací výkon se vztahuje na jednotku objemu bubnu cca 10 až 100 kg/m$^3$h. Spotřeba tepla je v rozmezí 4 až 8 MJ/kg. [4]




*Obrázek 2.5 Bubnová sušárna [31]*

### *2.1.1.6 Šachtové sesypávající sušárny*

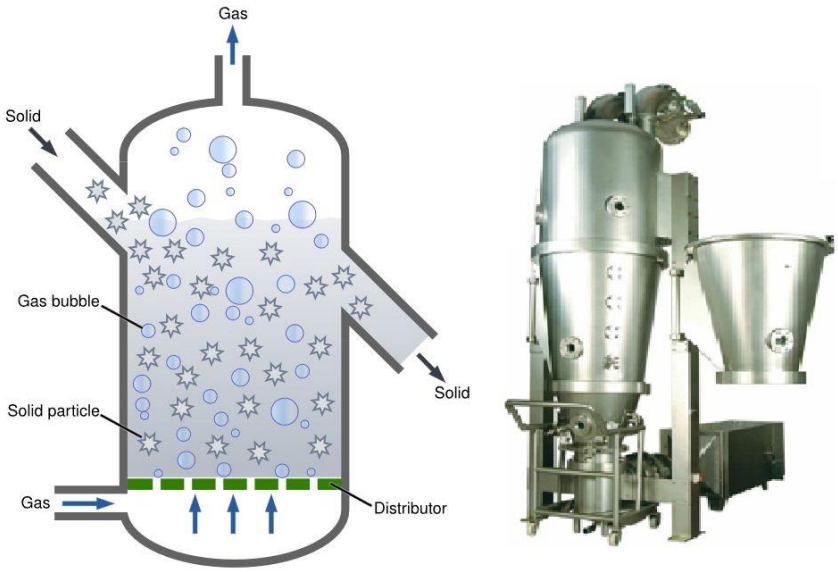
Proudění sušícího média je obvykle příčné. Vestavby zajišťují lepší promíchávání materiálu. Provoz je typicky kontinuální. Jsou vhodné pro sypké materiály: obilí, drcené uhlí. [4]



*Obrázek 2.6 Šachtová sesypávající sušárna [7]*

### *2.1.1.7 Fluidní sušárny*

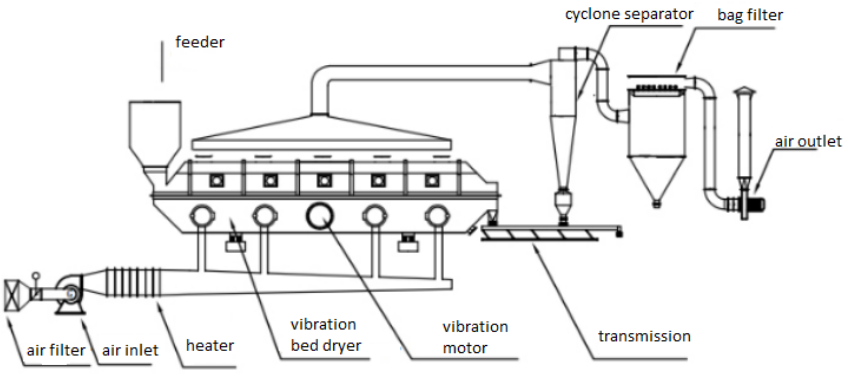
Sušení probíhá v bublinkujícím cirkulačním nebo fontánujícím fluidním loži. Sušícím i fluidním médiem mohou být vzduch nebo spaliny. Jsou vhodné pro monodispersní materiály (chemikálie, vláknité materiály, obilí, ovoce, zelenina, cukr krystal, glukóza). [4]




*Obrázek 2.7 Fluidní sušárny [26]*

### *2.1.1.8 Vibrofluidní sušárny*

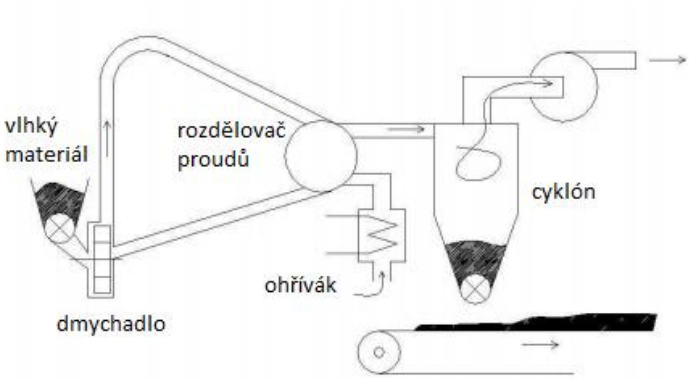
Používají se pro chlazení a dosušování meziproduktu např. z rozprašovacích sušáren. Jsou vhodné pro mléčné produkty, sůl, kyselinu citronovou atd. Odpařovací výkon je cca 90 kg/m$^3$h. Spotřeba tepla je v rozmezí 3,3 až 3,5 MJ/kg. [4]




*Obrázek 2.8 Vibrofluidní sušárna [28]*

### *2.1.1.9 Proudové sušárny*

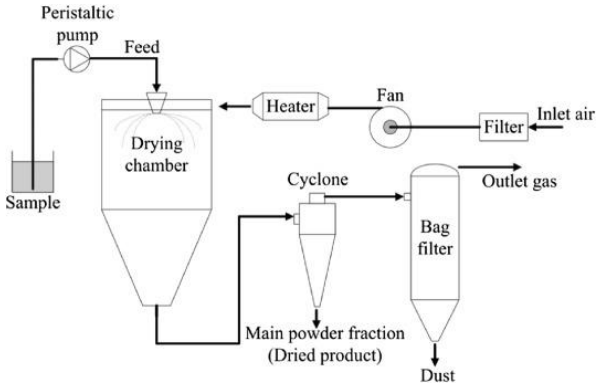
Rychlost sušícího vzduchu musí být vyšší než pádová rychlost sušených částic (8 až 40 m/s). Jsou vhodné pro práškovité, zrnité nebo vláknité materiály, pokud nejsou citlivé na mechanické poškození a pokud nejsou příliš abrazivní (škrob, mláto, lepky, kvasinky, kostní moučka, polévky, polymery, polystyren, kaolin). Velmi krátké doby zdržení umožňují odstranění pouze volné vody. Odpařovací výkon je v rozmezí 4 až 300 kg/m$^3$h. Spotřeba tepla je v rozmezí 3,7 až 8,8 MJ/kg. [4]




*Obrázek 2.9 Proudová sušárna [7]*

### *2.1.1.10 Rozprašovací sušárny*

Sušení disperze, která se rozpráší tryskami nebo rotujícím diskem. Většinou souproud, ale vyskytují se i jiné varianty. Rychlost kapek je cca 150 m/s, průměry kapek jsou 10 až 100 µm. Jde o šetrné sušení především mléka, vajec, zmrzlinových směsí, dětské výživy, kávy, kakaa, barviv, plastů. Odpařovací výkon je v rozmezí 1,5 až 48 kg/m$^3$h. Spotřeba tepla je v rozmezí 4,6 až 11 MJ/kg. [4]



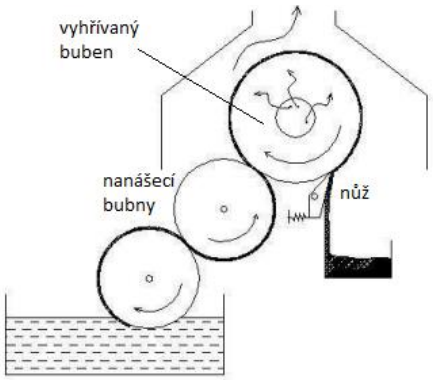

*Obrázek 2.10 Rozprašovací sušárna [32]*

### 2.1.2 Kontaktní sušárny

Přenos tepla probíhá kondukcí. Úkolem sušícího média je jen odvádění vlhkosti, proto lze využívat šetrné sušení termolabilních látek při nízkých teplotách za podtlaku. [4]

#### *2.1.2.1 Válcové sušárny*

Sušený materiál je nanášen na topný buben např. nanášejícími válečky nebo rozstřikem. U dvouválcové sušárny se suspenze může lít přímo do prostoru mezi válci. Rozvod páry i odvod kondenzátu osou bubnu. Válcové sušárny jsou obvykle atmosférické, i když existují i podtlaková provedení. Doby sušení jsou v rozmezí 2 až 10 s. Tloušťka vrstvy je do 0,5 mm. Jsou vhodné pro pastovité či kapalné látky (kvasnice, dětská výživa, ovocné vločky, krmiva). Odpařovací výkon je v rozmezí 7 až 30 kg/m$^3$h. Spotřeba tepla je v rozmezí 2,9 až 5,7 MJ/kg. [4]



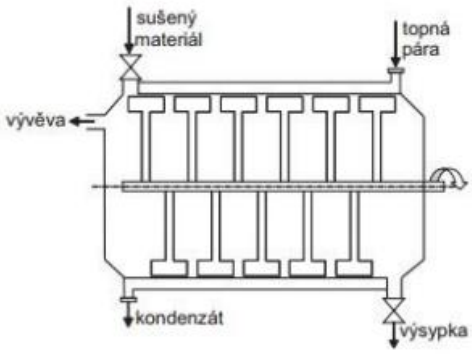

*Obrázek 2.11 Válcová sušárna [7]*

#### *2.1.2.2 Bubnové sušárny*

Uspořádání je prakticky totožné s bubnovou konvektivní sušárnou. Topným médiem je pára, která vyhřívá trubky vedené vnitřkem bubnu. Tyto trubky rotují spolu s bubnem a proto je třeba páru i kondenzát vést rotačními rozvaděči. Jsou vhodné pro křehké krystalické materiály a polymery. Spotřeba tepla je v rozmezí 3,8 až 6,3 MJ/kg. [4]

#### *2.1.2.3 Lopatkové sušárny*

Jsou to typické vakuové sušárny. Lopatky slouží k promísení sušeného materiálu. Vnější plášť slouží jako výhřevná plocha. Jsou vhodné pro sušení barev, práškových kovů, celulózy, škroby. Odpařovací výkon je v rozmezí 10 až 15 kg/m$^3$h. Spotřeba tepla je v rozmezí 2,9 až 4,2 MJ/kg. Při dosušování je odpar jen 0,5 kg/m$^3$h, spotřeba tepla je až 10 MJ/kg. [4]



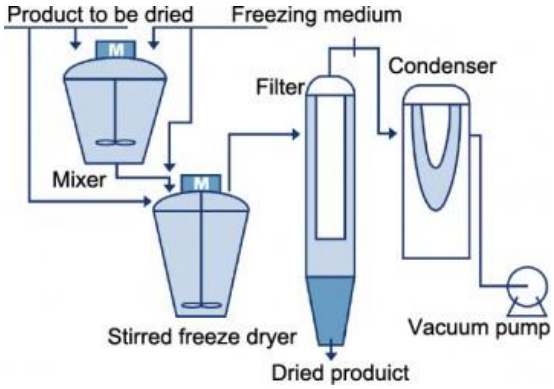

*Obrázek 2.12 Lopatková sušárna [4]*

#### *2.1.2.4 Sublimační sušárny*

Jde o energeticky i investičně nejnáročnější sušení. Jsou vhodné při extrémních nárocích na kvalitu zpracování (čaj, káva, krevní plasma, ovoce, zelenina, luštěniny, žampiony). Tyto sušárny pracují na dvou principech:

1) sušený materiál se zmrazí buď proudem vzduchu, zmrazením kontaktních ploch, kapalnými plyny nebo vakuovým chlazením,

2) sublimace ledu v komorách nebo tunelech, zpravidla za sníženého tlaku 10 až 100 Pa. Během sublimace se přivádí teplo z kontaktních ploch. Při zahřívání nesmí dojít k překročení teploty tání ledu. [4]

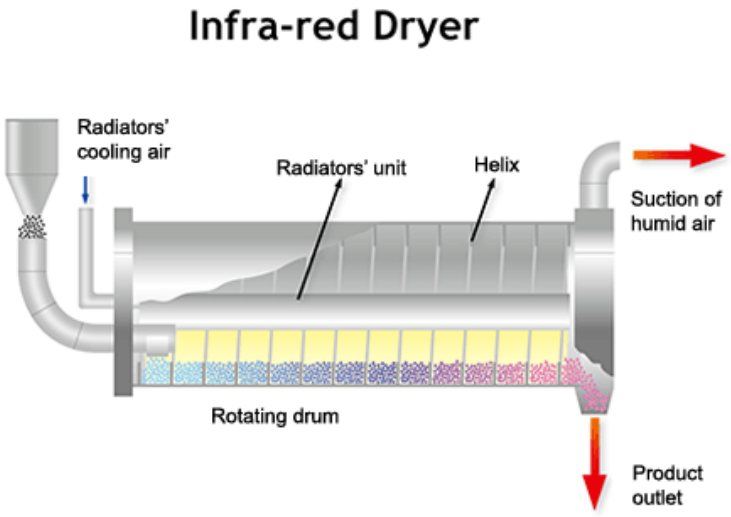



*Obrázek 2.13 Sublimační sušárna [24]*

### 2.1.3 Radiační sušárny

#### *2.1.3.1 Infračervený ohřev*

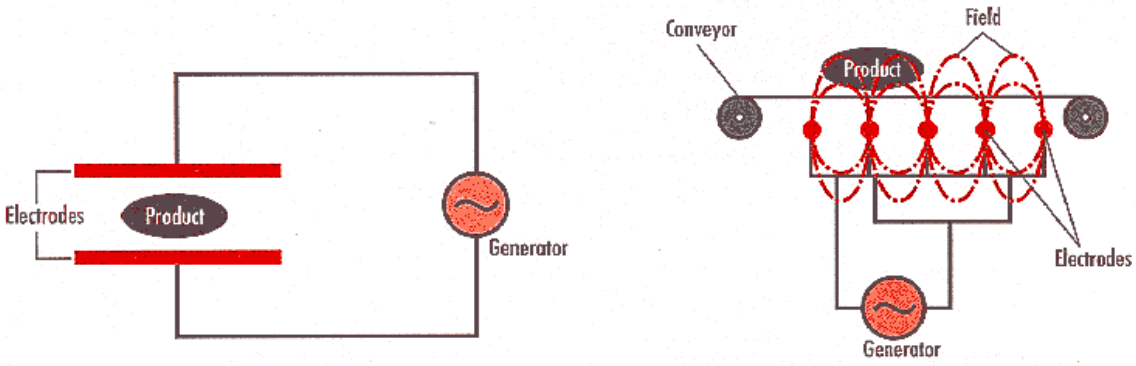
Záření je emitováno klasickými žárovkami nebo topnými tělísky či porézními keramickými deskami, na nichž probíhá katalytické spalování plynu. Sušárny se často kombinují s tryskovým konvektivním sušením. Jsou vhodné pro nátěry, papír, textil, ovoce, zeleninu, zrní, kakaové boby. Odpařovací výkon je až 35 kg/m$^3$h. [4]




*Obrázek 2.14 Sušárna využívající infračervené záření [29]*

### *2.1.3.2 Dielektrický ohřev*

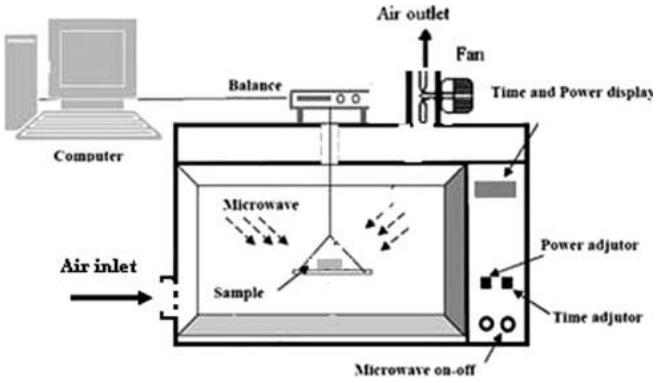
Má frekvenci elektromagnetického pole 1 až 200 MHz. Je vhodný pro dřevo, papír, plasty, termolabilní potraviny. Spotřeba energie je cca 3 MJ/kg. [4]




*Obrázek 2.15 Schéma dielektrického ohřevu [23]*

### *2.1.3.3 Mikrovlnné sušárny*

Mikrovlnné generované magnetronem na frekvenci 900 nebo 2450 MHz. Ohřev zevnitř vypuzuje vodu k povrchu sušeného materiálu. Jsou vhodné pro materiály s nízkou vlhkostí do 20 %. Mikrovlny ohřívají především polární látky (vodu, tuky, některé plasty), dále pro nátěry, lepidla, papír, kůže, textil, léky, keramiku, PVC, polyamidy, potraviny. [4]




*Obrázek 2.16 Mikrovlnná sušárna [16]*

## 2.2 Sušení

### 2.2.1 Sušící prostředí

Sušícím prostředím je obvykle vzduch, ale mohou to být i spaliny, pára nebo inertní plyny. Stav sušícího vzduchu charakterizuje obsah vlhkosti (měrná a relativní vlhkost), skutečná teplota, teplota rosného bodu, teplota mokrého teploměru, entalpie, hustota. [4]

Měrná vlhkost X – relativní hmotnostní podíl vodní páry (kg páry / kg suchého vzduchu). [4]

Relativní vlhkost φ – poměr hmotnostní koncentrace páry k maximální možné koncentraci páry v nasyceném vzduchu (při stejné teplotě). [4]

Entalpii vlhkého vzduchu, vztaženou k referenční teplotě 0 °C, vyjádříme jako součet entalpie suchého vzduchu a entalpie vodní páry

$$h_A = C_{pA}T_A + X_A\left(\mathcal{L} + C_{pw}T_A\right), \tag{2.1}$$

kde $h_A$ je entalpie vlhkého vzduchu, $C_{pA} = 1{,}01\frac{kJ}{kg.K}$ je měrná tepelná kapacita suchého vzduchu, $X_A$ je měrná vlhkost vzduchu, $\mathcal{L} = 2500\frac{kJ}{kg}$ je výparné teplo, $C_{pw} = 1{,}84\frac{kJ}{kg.K}$ je měrná tepelná kapacita vodní páry, $T_A$ je teplota vzduchu. [4]

Teplota rosného bodu $T_{dp}$ je teplota, při které je vzduch nasycen. Při dalším ochlazování začíná vodní pára kondenzovat. V h-x diagramu se teplota rosného bodu pro daný stav vzduchu odečte na průsečíku křivky nasycení a čáry měrné vlhkosti, odpovídající danému stavu vzduchu. Souvisí s měrnou vlhkostí vzduchu

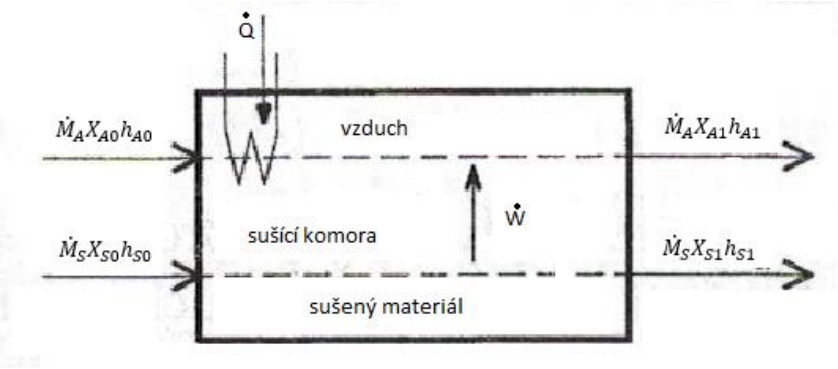
$$X_A = 0{,}622\frac{p''_{wA}(T_{dp})}{p_A - p''_{wA}(T_{dp})}, \tag{2.2}$$

kde $p_A$ je tlak suchého vzduchu a $p''_{wA}(T_{dp})$ je tlak par při teplotě rosného bnodu. [4] [19]

Teplota mokrého teploměru $T_{wb}$ je taková teplota vody, při níž je teplo potřebné k vypařování vody do vzduchu odebíráno přestupem tepla konvekcí z okolního vzduchu (při izobarickém ději). Je také označována jako mezní teplota adiabatického chlazení. [19]

### 2.2.2 Statika sušení

Zahrnuje materiálové bilance sušeného materiálu a sušícího média a tepelné bilance. Pro každý stupeň sušárny se ze známých parametrů vstupních proudů a z požadované výstupní vlhkosti materiálu vypočte vlhkost a teplota vzduchu, který sušárnu opouští. [4]




*Obrázek 2.17 Energetická bilance sušení [4]*

Schématu, uvedenému na obrázku odpovídá látková bilance

$$\dot{M}_A X_{A0} + \dot{M}_S X_{S0} = \dot{M}_A X_{A1} + \dot{M}_S X_{S1}\,, \tag{2.3}$$

přičemž hmotový průtok odpařené vody je dán vztahem

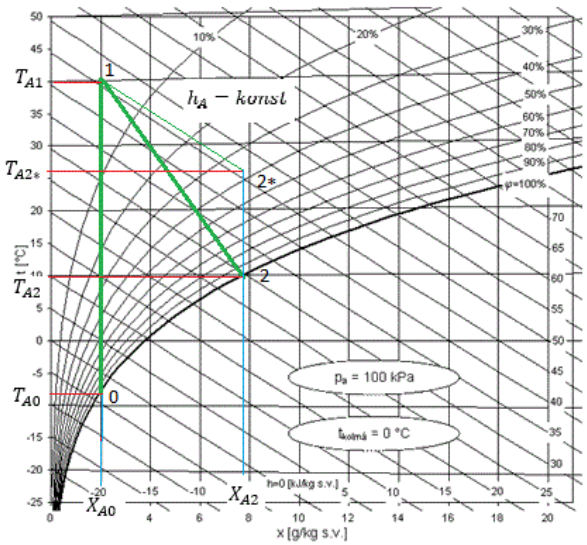
$$\dot{M} = \dot{M}_A(X_{A1} - X_{A0}) = \dot{M}_S(X_{S0} - X_{S1})\,. \tag{2.4}$$

Energetickou bilanci můžeme vyjádřit ve tvaru

$$\dot{Q} = \dot{M}_A(h_{A1} - h_{A0}) + \dot{M}_S(h_{S1} - X_{S0})\,, \tag{2.5}$$

kde $\dot{Q}$ je tepelný výkon, dodávaný do sušárny. Z průběhu sušení v h-x diagramu lze zjistit energetickou účinnost sušárny

$$\eta = \frac{teplo\ spotřebované\ na\ odpaření}{teplo\ dodané}\,. \tag{2.6}$$




*Obrázek 2.18 h-x diagram [22]*

Dodané teplo odpovídá úseku 0-1, pokud zanedbáme změnu entalpie vodní páry při ohřevu, můžeme ho vyjádřit jen rozdílem teplot $T_{A1} - T_{A0}$

$$q_{0-1} = C_{pA}(T_{A1} - T_{A0})\,. \tag{2.7}$$

Část tepla je využita pro odpaření vody, což je děj, který probíhá po čáře 1-2. Entalpie vlhkého vzduchu $h_A$ je dána součtem entalpie suchého vzduchu, která ve směru 1-2 klesá a entalpie vodní páry, která naopak roste. Teplo využité pro odpaření vody můžeme odhadnout z poklesu entalpie suchého vzduchu za předpokladu, že sušení probíhá při konstantní entalpii vlhkého vzduchu (čára 1-2*)

$$q_{1-2*} = C_{pA}(T_{A1} - T_{A2*})\,, \tag{2.8}$$

čemuž odpovídá celková účinnost sušárny

$$\eta = \frac{T_{A1} - T_{A2*}}{T_{A1} - T_{A0}}\,. \tag{2.9}$$

Odtud plyne, že pro zvýšení energetické účinnosti sušárny by bylo vhodné snížit teplotu $T_{A2*}$ co nejníže. [4]

### 2.2.3 Kinetika sušení

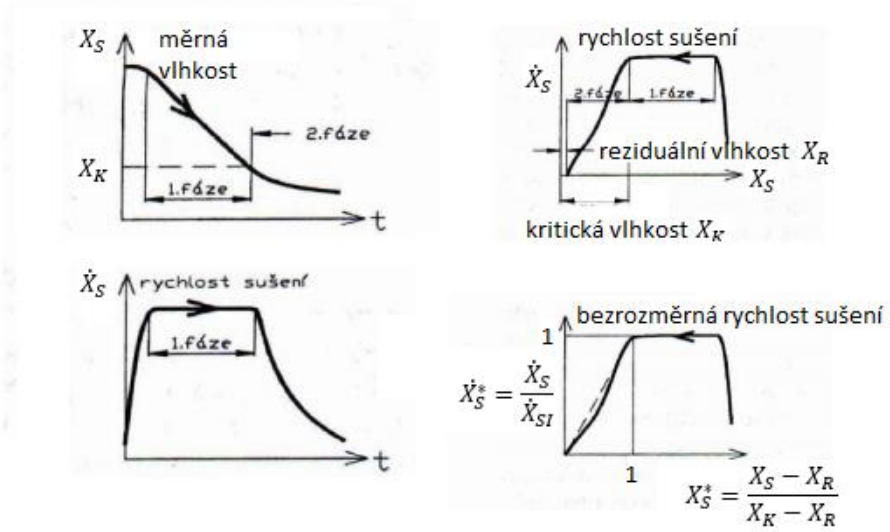
Kinetika sušení pojednává o délce sušení materiálu při periodickém sušení nebo délce kontinuální pásové sušárny, aby bylo dosaženo požadovaných parametrů. Způsoby analýzy se dosti liší dle typu sušárny, každopádně se neobejdeme bez experimentů či experimentálních dat. [4]

#### *2.2.3.1 Sušící křivky*

Základní experiment spočívá v sušení vzorku materiálu při konstantních parametrech sušícího prostředí (konstantní teplota a vlhkost vzduchu). Závislost měrné vlhkosti materiálu $X_S$ na čase je křivka sušení a záporně vzatá časová derivace měrné vlhkosti je rychlost sušení $\dot{X}_S$. Zobecněná sušící křivka je závislost bezrozměrné rychlosti sušení $\dot{X}_S^*$ na bezrozměrné vlhkosti vzorku $X_S^*$. Bezrozměrná rychlost sušení je změřená rychlost sušení $\dot{X}_S$ dělená rychlostí sušení, které by bylo dosaženo u mokrého vzorku $\dot{X}_{SI}$, tuto hodnotu je třeba spočítat jako rychlost sušení z volné hladiny vody při teplotě $T_{wb}$, zjišťované měřením teploty povrchové vrstvy materiálu. Bezrozměrná vlhkost materiálu

$$X_S^* = \frac{X_S - X_R}{X_K - X_R}, \tag{2.10}$$

kde $X_R$ je zbytková vlhkost a $X_K$ je kritická vlhkost, odpovídající ukončení první fáze sušení, při které se odstraní volná voda. [4]




*Obrázek 2.19 sušící křivky [4]*

# 3 Fluidní sušení

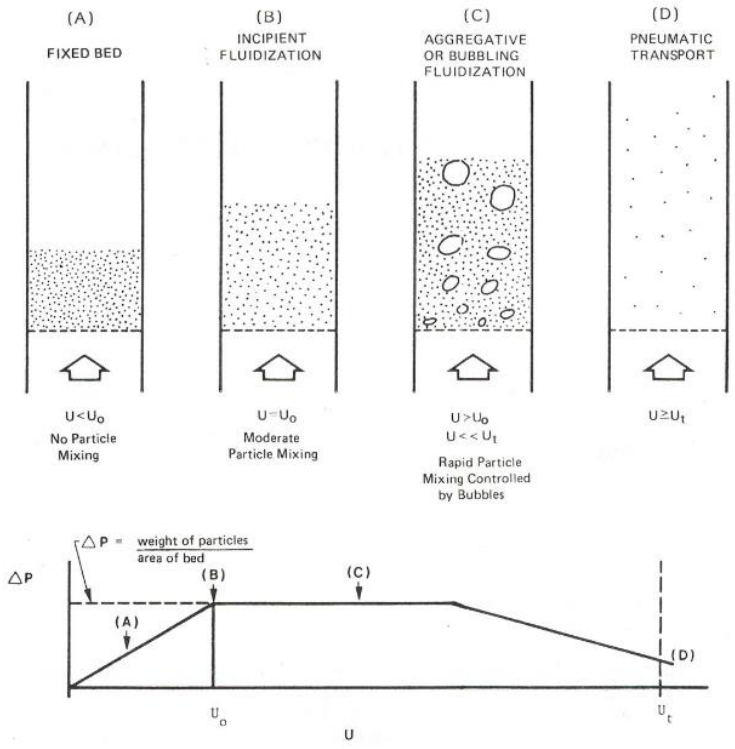
## 3.1 Úvod

Fluidní sušení je proces, při kterém sušení probíhá ve fluidní vrstvě fluidované sušícím médiem. Rozeznáváme dva způsoby: a) sušení v husté fluidní vrstvě, b) sušení v řídké fluidní fázi, kde sušená látka tvoří úletový mrak (sušárny proudové, pneumatické). Pokud se budeme bavit o sušení biomasy, budeme rozebírat sušení v husté fluidní vrstvě. Sušící médium vstupuje do fluidní vrstvy roštem. Z fluidní vrstvy sušeného materiálu vynáší sušící médium jemnější částice sušené látky. Sušený materiál odebíráme na dvou místech: hrubozrnný z fluidní vrstvy a menší částice z odlučovačů prachu. V sušárně se snažíme udržet stále stejné množství sušeného materiálu. Průtok sušícího média volíme takový, aby byl sušený materiál dobře promícháván. Teplota sušené látky je prakticky stejná v celém objemu vrstvy až na malou oblast těsně nad roštem. Promíchávání způsobuje, že se částice sušené látky nesuší v kontinuálně pracující sušárně stejně dlouho a ze sušárny vystupují i zrna nedosušená. Při vysokých rychlostech sušícího média (dobré promíchávání) zase může způsobovat abrazi součástí sušárny. Tyto neblahé důsledky zmírníme, pokud použijeme více fluidních vrstev za sebou nebo upravíme tvar sušárny nebo zmenšíme rychlost proudění sušícího média. Teplo se sušené látce přivádí sušícím médiem, tedy konvekcí. [2] [5]

Použití sušení ve fluidním loži pro zrnité materiály je nyní dobře zavedeno v potravinářském a chemickém průmyslu, ve kterém již pracují tisíce fluidních sušáren, ačkoli základní výzkum sušení ve fluidním loži nedosáhl úplného pokroku a průmyslové fluidní sušárny jsou založené na empirických znalostech. Výhody, které tato technologie nabízí ve srovnání s jinými způsoby sušení jsou v zásadě následující. [2]

Rovnoměrný tok fluidovaných částic umožňuje nepřetržitý, automaticky řízený provoz a snadnou manipulaci s materiálem. Nejsou zde žádné mechanické pohyblivé části, a má tak velmi nízkou údržbu. Rychlou výměnou tepla mezi plynem a částicemi se zabrání přehřátí tepelně citlivých produktů. Rychlé smíchání pevných látek vede k téměř izotermickým podmínkám v celém fluidním loži, a tak lze snadno dosáhnout spolehlivé kontroly procesu sušení. [2]

Když je plyn veden vzhůru, bude při nízkých rychlostech pronikat pouze skrz pevné částice. Když se rychlost plynu bude zvyšovat, nakonec překročí tlakovou ztrátu vrstvy (rychlost vzduchu je rovna $U_0$). V tomto bodě jsou všechny částice nadnášeny vzhůru. Částice jsou nyní ve fluidované vrstvě, a ačkoli se homogenní vrstva částic chová jako kapalina, dochází pouze k mírnému promíchávání částic. Když se rychlost plynu bude dále zvyšovat nad rychlost $U_0$, budou skrz vrstvu pronikat větší bubliny plynu a fluidní vrstva bude nabývat větších rozměrů. [2]




*Obrázek 3.1 Znázornění průběhu fluidní vrstvy při zvyšování rychlosti plynu [2]*

Tyto bubliny budou u distributoru plynu malé, nicméně se rychle spojí a začnou stoupat přes vrstvu materiálu a způsobovat intenzivní promíchávání fluidovaných částic. Při ještě vyšších rychlostech plynu je dosaženo bodu, ve kterém jsou síly zvýšeny do té míry, že částice jsou odtrhávány a jsou vynášeny z fluidního lože. Fluidní vrstva může být ve svém chování porovnána s chováním vroucí kapaliny, to znamená, že vrstva při fluidaci má tvar nádoby. [2]

## 3.2 Vlastnosti částic

Materiály, které jsou vhodné pro sušení ve fluidním loži, lze obecně charakterizovat podle několika kritérií. [2]

Průměrná částice by měla být v rozmezí někde mezi 20 µm až 10 mm. Velmi jemné částice mají tendenci se shlukovat, tímto tyto částice normálně špatně fluidují. Naopak příliš velké částice se ve fluidním loži chovají velmi nepravidelně. [2]

Rychlost sušícího plynu musí být zvolena tak, aby poskytovala účinnou fluidaci bez nadměrného odtrhávání jemných částí. [2]

Částice musí mít přiměřeně pravidelný tvar, zejména pokud je průměr velikosti částic velký. [2]

Vlhké kousky se musí snadno rozbíjet, protože jinak by lože mohly defluidovat, jelikož by se nalepili na desku rozdělovače plynu. [2]

Částice musí mít dostatečnou pevnost, aby odolaly otěru, ke kterému dochází mezi fluidovanými částicemi, protože jsou intenzivně míchány vzrůstajícími bublinami plynu. [2]

Konečný produkt nesmí být lepivý při teplotách požadovaných pro sušení materiálu na požadovanou vlhkost produktu nebo dochází k nahromadění a tím by došlo k tzv. defluidaci. [2]

## 3.3 Vlastnosti fluidní vrstvy

### 3.3.1 Prahová rychlost fluidace sušícího plynu

Prahová rychlost fluidačního plynu je základním parametrem charakterizující systém a bylo provedeno mnoho pokusů o nalezení zobecněné rovnice, která by předkládala hodnoty pro prahovou rychlost plynu. [2]

Použitím výrazu pro vztah mezi tlakovou ztrátou a rychlostí pro nehybné fluidní lože může být tato vypočtená tlaková ztráta rovna vztlakové hmotnosti částic za předpokladu, že je známo $\varepsilon_0$ (mezerovitost sušeného materiálu při prahové rychlosti fluidace). Tento poměr bude záviset na tvaru a rozsahu částic. U kulovitých částic lze předpokládat hodnotu 0,4. Nebylo však možné vytvořit obecně platný vztah pro $\varepsilon_0$. Tlaková ztráta fluidní vrstvy při prahové fluidaci je

$$\Delta P_0 = \left(\rho_{solid} - \rho_g\right)(1 - \varepsilon_0) H_0 g \,. \tag{3.1}$$

U jemných částic v pevné vrstvě bude vztah pro rychlost vlivem poklesu tlaku dán rovnicí Cannen-Kozeny, která bude mít následující tvar pro prahovou rychlost fluidace

$$U_0 = \frac{\varepsilon_0^3}{5(1-\varepsilon_0)^2} \frac{\Delta P_0}{S \mu H_0} \,. \tag{3.2}$$

Proto z rovnic (3.1), (3.2) a za předpokladu, že S = 6 / d, a vezmeme-li $\varepsilon_0$ = 0,4, dostaneme první aproximaci pro $U_0$

$$U_0 = \frac{d^2\left(\rho_{solid} - \rho_g\right) g}{1695 \mu} \tag{3.3}$$

Tato rovnice má jen omezené použití, protože částice jsou považovány za dokonalé koule a $\varepsilon_0$=0,4. Pro většinu systémů 0,4 < $\varepsilon_0$ < 0,55. Doporučuje se tedy pro výpočet $U_0$ následující rovnice, opět za předpokladu $\varepsilon_0$ = 0,4:

$$Re_0 = \sqrt{C_1^2 + C_2 Ar} - C_1 \,, \tag{3.4}$$

$$Re_0 = \frac{d U_0 \rho_g}{\mu} \,, \tag{3.5}$$

$$Ar = \frac{\rho_g\left(\rho_{solid} - \rho_g\right) g d^3}{\mu^2} \,, \tag{3.6}$$

kde $C_1 = 27{,}2$ a $C_2 = 0{,}0408$. [2]

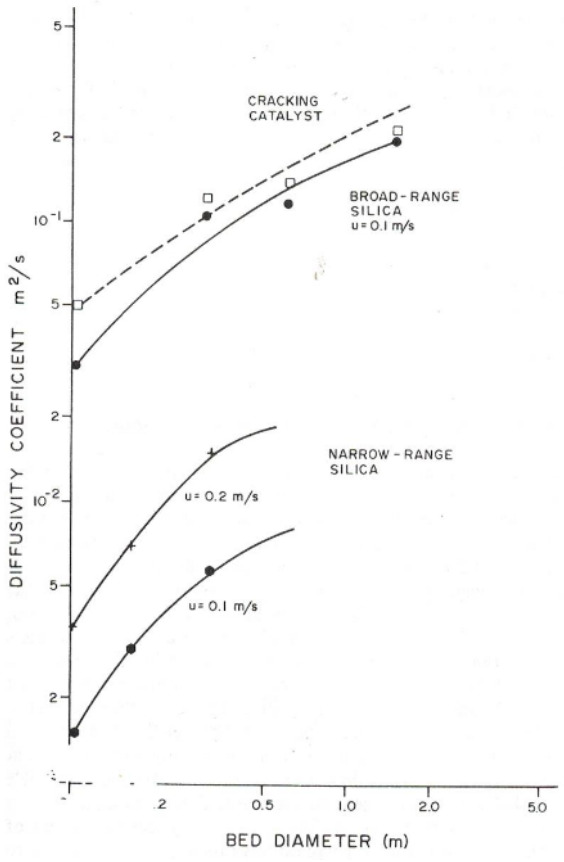
Je uvedeno, že rovnice (3.4) funguje poměrně dobře v širokém rozsahu podmínek, pokud částice nepatří do Geldartovy skupiny C (kohezivní), což je skupina velmi jemných prášků. Normální fluidace

je pro tyto pevné látky extrémně obtížná, protože síly mezi částicemi jsou větší než síly, které způsobí proudící plyn. Pro tyto pevné látky je typický prášky jako mouka a škrob. Dále by mělo být poznamenáno, že pevné látky s širokým rozsahem velikosti částic mají tendenci fluidovat s menším průtokem plynu, než je požadováno při práci s materiálem podobné průměrné velikosti. Podobně je mezerovitost nepravidelně tvarovaného materiálu vyšší než pro sférické částice podobné velikosti. V souladu s tím lze $U_0$ stanovit jednoduchým testem v malém fluidním loži, měřením tlakové ztráty fluidní vrstvy ΔP v závislosti na rychlosti plynu U. [2]

### 3.3.2 Míchání částic ve fluidním loži

Těsně nad rozdělovačem dochází k velmi intenzivnímu míchání fluidovaných částic a teplo a hmota mohou být velmi účinně přenášeny mezi částicemi a procházejícím plynem. [2]

Protože míchání je primárně způsobeno stoupajícími bublinami, závisí na celkovém objemovém toku bublin. Vertikální rychlost míchání je několikrát větší než rychlost míchání v horizontálním směru. Rychlost míchání se zvyšuje se snižováním průměrné velikosti částic, protože jemnější materiál je fluidován lépe než hrubý materiál. De Groot změřil koeficient axiální (vertikální) difuzivity v různých velikostech zařízení, jak je znázorněno na obrázku (3.2). Z obrázku (3.2) je patrné, že průměr fluidního lože má výrazný účinek pro míchání s průměrem menším než 0,3 m. Toto pozorování poukazuje na skutečnost, že s daty je třeba zacházet opatrně, pokud jsou data použita pro zvětšení fluidního lože na průmyslovou velikost. [2]




*Obrázek 3.2 Závislost koeficientu axiální difuzivity na průměru fluidního lože [2]*

### 3.3.3 Výběr rychlosti plynu

Je vždy rozumné zvolit rychlost plynu, která je alespoň dvakrát až třikrát větší než prahová rychlost fluidace částic. U průmyslových sušáren s fluidním ložem je důležité mít fluidní lože s dostatečným

promícháváním částic, aby se zajistila rovnoměrná teplota v celé vrstvě. Dále by nadměrné částice měly být snadno transportovány a neměly by způsobovat defluidaci. Aby bylo možné navrhnout co nejmenší sušičku, měla by být rychlost plynu zvolena velká, ale taková, aby neumožňovala odtrhávání jemných částic do výfukového systému. [2]

Některý materiál se z fluidní vrstvy ztratí, když se částice vhazují do prostoru nad ložem. Jemnější materiál pak bude mít přirozeně tendenci sledovat plyn k výfukům, zejména pokud je rychlost plynu blízko k tzv. úletové rychlosti částic. Úletová rychlost může být popsána, pokud je tok laminární podle Stokesova zákona:

$$U_t = \frac{(\rho_{solid} - \rho_g) g d^2}{18\mu}. \tag{3.7}$$

Rovnice (3.7) udává horní mez pro výběr rychlosti plynu. Velikost rychlosti plynu má důležitý vliv na množství částic ztracených ve výfukovém systému, protože koncentrace částic těsně nad fluidní vrstvou je velmi vysoká a to díky praskajícím bublinám. Níže jsou uvedeny typické rychlosti plynu pro fluidovaný produkt s hustotou částic mezi 1000 až 2000 kg/m$^3$. [2]

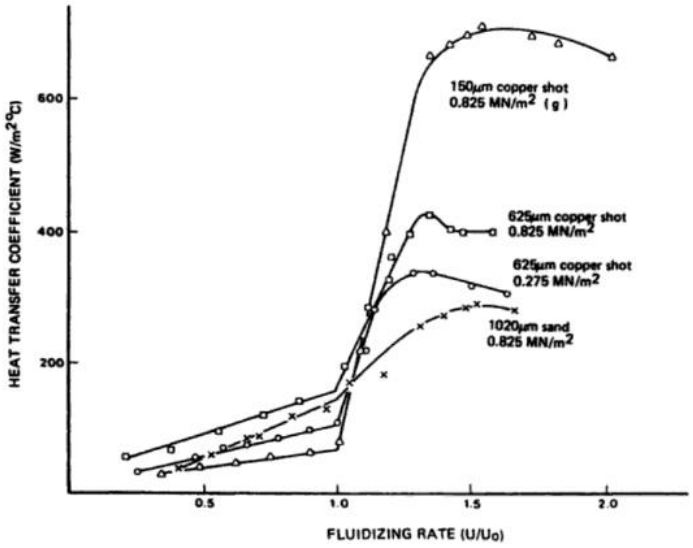
| Average particle size ($\mu$m) | Velocity (m/s) |
|---|---|
| 100– 300 | 0.2–0.4 |
| 300– 800 | 0.4–0.8 |
| 800–2000 | 0.8–1.2 |
| 2000–5000 | 1.2–3.0 |

*Tabulka 3.1 Tabulka pro odhadovanou rychlost fluidačního plynu na základě velikosti částic [2]*

### 3.3.4 Přenos tepla ve fluidním loži

Plynné fluidní lože se vyznačuje dobrými vlastnostmi přenosu tepla mezi fluidní vrstvou a topnými nebo chladicími povrchy. Tento přenos tepla může být důležitým konstrukčním parametrem, proto byla provedena rozsáhlá práce s cílem vyvinout zobecněné rovnice pro odhad přenosu tepla. [2]

Přenos tepla je silně závislý na tepelné kapacitě částic a stupni cirkulace částic na teplosměnných plochách kvůli rostoucím plynovým bublinám. Koeficient přenosu tepla dramaticky vzroste, když se lože přemění z nehybného lože do probublávajícího fluidního lože s rychlým mícháním částic. Částice zahřáté tímto způsobem rychle odvádějí své teplo okolním částicím ve fluidní vrstvě. Experimentální data pro určení koeficientu přenosu tepla do fluidního lože je znázorněno na obrázku (3.3).




*Obrázek 3.3 Závislost koeficientu přenosu tepla na vzrůstající rychlosti fluidačního plynu [2]*

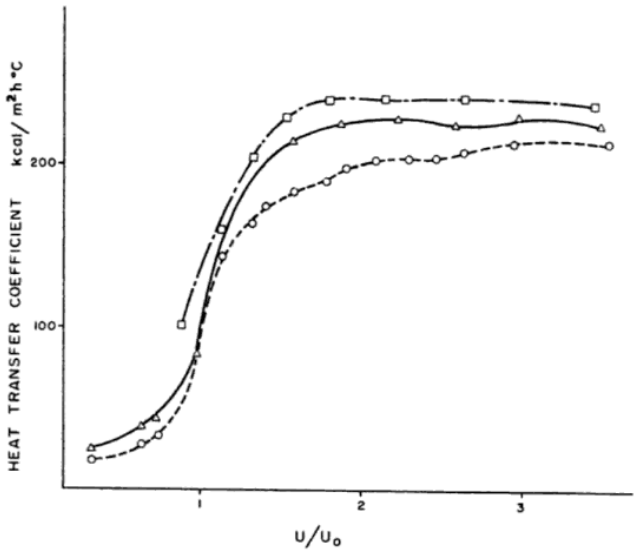
Můžeme poznamenat následující:

vysoké rychlosti a tím i dobré míchání částic (prostřednictvím intenzivního bublání) jsou nezbytné pro efektivní přenos tepla,

přenos tepla mezi částicemi je příznivý, protože objemová tepelná kapacita částic je větší než kapacita plynu. [2]

V sušičkách se používají vodorovné svazky trubek jako zdroj dodávající teplo procesu sušení. Mnoho povrchu pro přenos tepla může být vystaveno cirkulaci pevných látek vyvolané stoupajícími bublinami, horizontální trubky však mají dvě oblasti s nízkými přenosovými vlastnostmi. Defluidované částice na vrcholu vodorovného povrchu trubek budou bránit účinnému přenosu tepla a v horším případě může být materiál poškozen teplem. Ve styku s bublinami zakrývající povrch trubek se výrazně snižuje přenos tepla. [2]

Obrázek (3.4) ukazuje některá typická data pro závislost koeficientu přenosu tepla pro horizontální trubkové svazky ve fluidních vrstvách s ohledem na rychlost plynu a vzdálenost mezi trubkami. Je vidět, že součinitel přenosu tepla je závislý na rychlosti. [2]

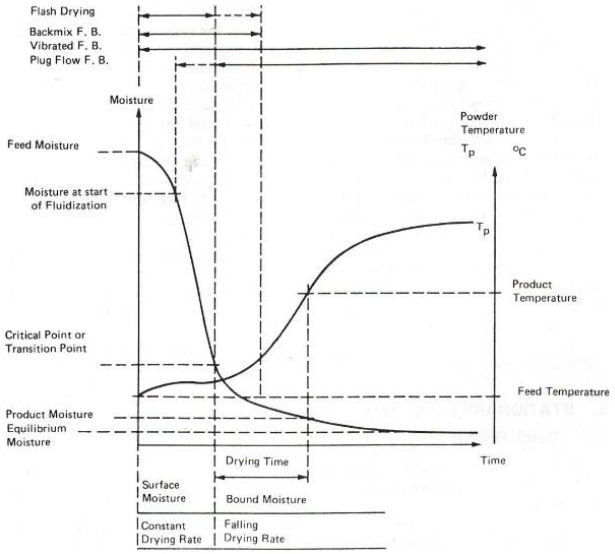



*Obrázek 3.4 Závislost koeficientu přenosu tepla pro horizontální trubky na rychlosti fluidačního plynu [2]*

Pro predikci přenosu tepla z trubic, jak vertikálních, tak horizontálních, byly navrženy četné rovnice. Doporučuje se však, aby skutečné koeficienty přenosu tepla v zařízeních byly měřeny za co nejrealističtějších podmínek, aby se získaly spolehlivé hodnoty pro návrh průmyslové sušárny s fluidním ložem. [2]

## 3.4 Sušení fluidovaných částic

Každý produkt má své vlastní charakteristiky křivky sušení. Křivky sušení mohou být stanoveny z testovacího pokusu při sušení v malém měřítku ve fluidním loži vynesením dat v závislosti na čase. Typická křivka sušení je znázorněna na obrázku (3.5) spolu s přidruženou křivkou teploty produktu měřenou během testu sušení vsádkovým sušením. [2]




*Obrázek 3.5 Závislost vlhkosti a teploty materiálu na čase při sušení [2]*

Z obrázku (3.5) je patrné, že povrchová vlhkost se rychle vypařuje a brzy se dosáhne tzv. přechodového bodu nebo kritického bodu sušicí křivky. Avšak při nižším obsahu vlhkosti je sušení řízeno rychlostí difúze vlhkosti uvnitř částic a rychlost sušení se výrazně snižuje. Pokud je požadován velmi nízký obsah vlhkosti v konečném produktu, může být doba zdržení produktu v sušce i několik

hodin. Teplota produktu se po počátečním období, během kterého odpařování vlhkosti udržuje teplotu nízkou, zvýší na přibližnou vstupní teplotu sušicího plynu. [2]

Výměna tepla a vlhkosti ve fluidním loži je omezená, protože proud plynu je rychle nasycený. Po dlouhou dobu zůstává vsádkové fluidní lože vlhčí než kontinuálně pracující plně smíšené fluidní lože, kde kontakt mezi mokrými a suchými fluidními částicemi výrazně zvyšuje výměnu tepla a vlhkosti. [2]

U materiálů s nízkým až středním vnitřním odporem vůči přenosu hmoty lze čas potřebný k dosažení daného obsahu vlhkosti při zkoušce vsádkovým sušením považovat za úměrný hmotnosti lože na jednotku plochy a nepřímo úměrná rychlosti plynu. V souladu s tím mohou tepelné a hmotnostní bilance v dobře promíchané sušárně s fluidním ložem v jednoduchých případech systém adekvátně popsat a není nutné používat komplikované modely. Maximální teplota sušícího vzduchu bude určena citlivostí produktu na teplo. Pokud je tato maximální teplota překročena, bude mít sklon k tvorbě usazenin na desce rozdělovače vzduchu a fluidace se může zastavit. Teplotní limit může být stanoven pilotním testem sušení ve fluidním loži. [2]

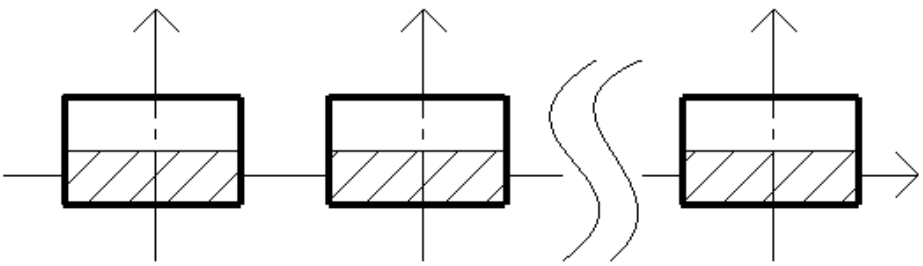
Takový test také stanoví praktické meze rychlosti fluidačního vzduchu. Pod určitou hodnotou dojde k nerovnoměrné fluidaci a větší částice v materiálu nebudou fluidovány. Při určité rychlosti vzduchu bude z fluidní vrstvy docházet k nadměrnému odtrhávání menších částic. Celkové množství sušícího vzduchu, a tedy i velikost sušičky, bude tímto způsobem pro danou teplotu a rychlost fluidizace funkcí tepelného příkonu. [2]

Když je sušení řízeno difúzí vlhkosti uvnitř částic, experiment vsádkového sušení určí nezbytnou dobu sušení pro daný materiál v ideální sušárně s fluidním ložem. Pokud je pro průmyslovou sušárnu materiál dostatečně známý, skutečná požadovaná doba sušení může být vypočtena. [2]

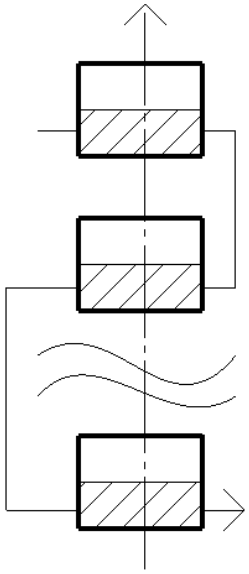
Oblasti, ve kterých lze použít různé typy sušáren s fluidním ložem, jsou znázorněny na obrázku (3.5). [2]

## 3.5 Fluidní sušárny

Nejprve rozdělíme fluidní sušárny podle různých hledisek. Podle povahy provozu můžeme rozdělit fluidní sušárny na kontinuální a diskontinuální. Tlak sušícího prostředí se příliš neliší od tlaku atmosférického, avšak jednotlivá zařízení nám umožňují pracovat jak s podtlakem i přetlakem. Dále nalezneme sušárny vícefázové, kde jsou fluidní vrstvy zařazeny nad sebou a sušící prostředí prochází z jedné vrstvy do druhé, nebo sušárny vícestupňové, u kterých mohou být fluidní vrstvy uspořádány nad sebou nebo za sebou a každá sekce má přívod čerstvého sušícího média jako na obr. (3.6). [5]



*Obrázek 3.6 Vícestupňové uspořádání [5]*

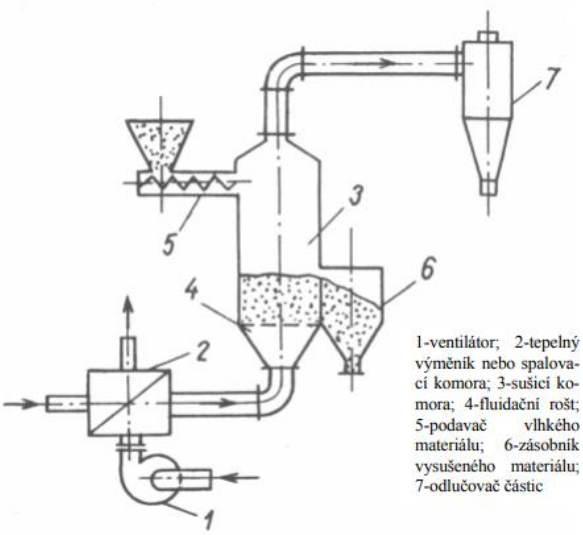


*Obrázek 3.7 Vícefázové uspořádání [5]*

Dále podle druhu použitého sušícího média jsou fluidní sušárny spalinové, horkovzdušné nebo pracující s inertním plynem. [5]

## 3.6 Konstrukční prvky fluidních sušáren

Ventilátor vhání sušící médium do tepelného výměníku, kde se ohřeje a vstupuje pod rošt sušárny. Sušený materiál je přiváděn podavačem a produkt přepadá do zásobníku, který se vyprazdňuje. V odlučovacím zařízení se zbavujeme prachu ze sušící komory. [5]




*Obrázek 3.8 Konstrukční prvky fluidní sušárny [33]*

### 3.6.1 Ventilátor

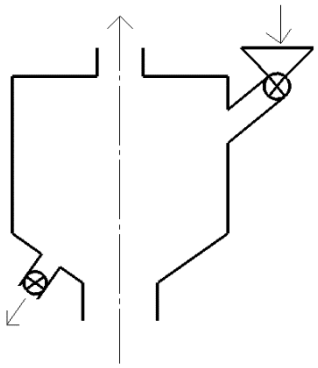
Zajišťuje průtok sušícího média sušárnou. K tomu je třeba vysokotlakových ventilátorů a dmychadel, abychom překonali hydrodynamický odpor potrubí, fluidní vrstvy, roštu a odlučovačů. Pokud zařadíme ventilátor před zařízení, pracuje zařízení v přetlaku. V tomto případě spotřebujeme méně elektrické energie a je usnadněno odvádění vysušené látky. Při zařazení ventilátoru za sušící zařízení

pracuje zařízení v podtlaku, což se používá při sušení látek, u kterých mohou unikat jedovaté zplodiny nebo organická rozpouštědla apod. Usnadní se tím také dávkování. Zapojení se dají i kombinovat, např. u dvouetážových sušáren lze umístit ventilátor tak, aby jedna vrstva byla v podtlaku a druhá v přetlaku. [5]

### 3.6.2 Sušící komora

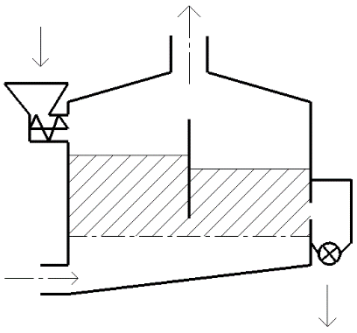
Fluidní sušárny jsou tvořeny ocelovým pláštěm kruhového nebo pravoúhlého průřezu, uvnitř nebo vně tepelně izolovaného. Kruhový průřez se považuje za hydrodynamicky vhodnější, avšak u pravoúhlém průřezu lze libovolně měnit rozměry. Sušárny jsou rozděleny roštem na dvě části. Kvůli snadnějšímu čištění roštu a vnitřku sušárny by bylo vhodné mít spodní část sušárny sklopnou. U periodických sušáren je zase spodní část volně připojena k horní a pohybuje se na posuvném mechanismu, čímž usnadníme plnění a vyprazdňování materiálu. Horní část sušárny může být kuželového, válcového tvaru nebo se může rozšiřovat, aby se snížila rychlost vystupujících plynů a množství odváděného prachu. Při sušení polydisperzních materiálů je vhodné horní část zúžit k roštu, abychom docílili fluidace i velkých částic materiálu. Horní část je opatřena dávkovačem, vynášečem a otvorem pro odvádění plynů. Někdy se přivádí část sušícího média tangenciálně nad rošt sušárny, čímž docílíme krouživého pohybu částic fluidní vrstvy. Může být taky opatřena čistícími otvory nebo vybavena mechanismem, který usnadní fluidaci. [5]

Bezroštové sušárny jsou založeny na tom, že při vysoké lineární rychlosti sušícího média při vstupu do sušárny nepropadají částice fluidní vrstvy do přívodního potrubí. [5]



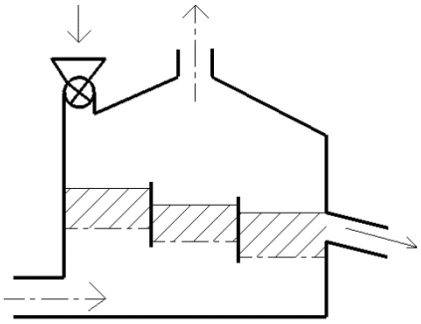
*Obrázek 3.9 Bezroštová fluidní sušárna [5]*

Aby byla doba zdržení částic produktu v sušárně rovnoměrnější, opatřuje se horní část sušárny přepážkami, které zasahují do fluidní vrstvy shora nebo zdola a dělí fluidní vrstvu na několik úseků. Mluvíme potom o vícestupňové sušárně. [5]



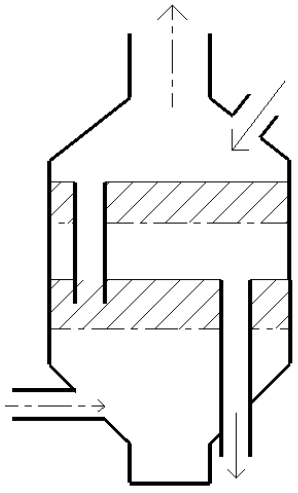
*Obrázek 3.10 Dvoustupňová fluidní sušárna [5]*

Jednotlivé stupně bývají často uspořádány kaskádním způsobem a mohou být řazeny i nad sebou. Při sušení látek, které při nízkém obsahu vlhkosti mohou vzplanout nebo se rozkládat, budují se jednotlivé stupně odděleně jako samostatné jednotky se vším příslušenstvím. U vícestupňových sušáren se často používá posledního stupně ke chlazení hotového produktu. [5]



*Obrázek 3.11 Třístupňová fluidní sušárna [5]*

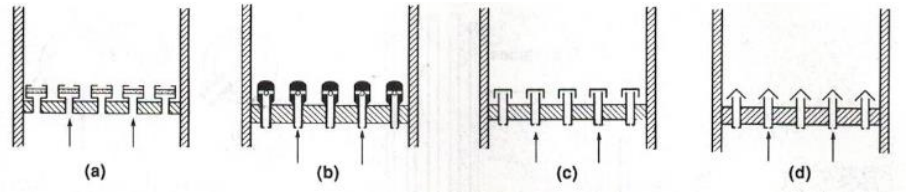
Vícefázové sušárny mohou mít i protiproudé uspořádání, u nichž je třeba překonávat větší tlakový spád, odpovídající počtu fluidních vrstev. [5]



*Obrázek 3.12 Dvoufázová fluidní sušárna [5]*

### 3.6.3 Rošt

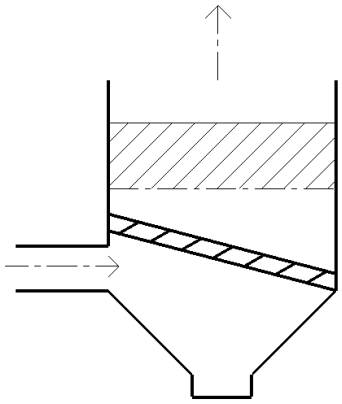
Rošt je umístěn ve spodní části sušárna a slouží k rovnoměrnému přivádění sušícího média po průřezu sušárny. Při přerušení provozu nese sušený materiál. Je tvořen z jednotlivých roštnic, které jsou staženy šrouby a mezi nimi je udržována mezera distančními vložkami. Kvůli dobrému rozdělování vzduchu bývají rošty kloboučkové. Byly navrženy i pohyblivé rošty, jejichž účelem je vynášet spečené částice nebo udělovat částicím fluidní vrstvy rotační pohyb. Také existují rošty vibrující, které svým pohybem napomáhají fluidaci. U nízkoteplotních sušáren (do 500 °C) se používá běžná konstrukční ocel, u vyšších teplot se používají legované ocele nebo žáruvzdorné betony (směs vodního skla, fluorokřemičitanu sodného a plnidla). [5]




*Obrázek 3.13 Detaily různých typů roštů: a) porézní, b) tryskové, c) a d) kloboučkové [1]*

### 3.6.4 Rozdělovače vzduchu

Rozdělovače vzduchu mají zaručit rovnoměrné rozdělení sušícího média po ploše roštu a konstruují se tak, aby nekladly příliš velký odpor. Skládají se ze svazku žeber, který se umisťuje do spodní části sušárny. [5]



*Obrázek 3.14 Znázorněn rozdělovače vzduchu [5]*

### 3.6.5 Odvádění sušeného materiálu

U sušáren pracujících s přetlakem nám postačí otvor ve stěně sušárny s vypouštěcí trubkou, která se zavírá klapkou. Vypouštěcí trubka se umisťuje těsně nad roštem, aby se větší částice nehromadili na roštu. U sušáren pracujících s pod tlakem je třeba sušený materiál odvádět ze sušárny pomocí dopravního šneku, který zasahuje do fluidní vrstvy nad roštem. Také se může odvádět proudem sušícího média a odvádí se z odlučovačů prachu. [5]

### 3.6.6 Dávkovací zařízení

Sypké hmoty se dávkují běžnými dávkovači jako např. turniket, talířový podavač. Je možné dávkovat shora nebo boku sušárny nad fluidní vrstvu. Užívá se i vibračních dávkovačů, které mají tu výhodu, že nemají pohyblivé součásti. Také se dá dopravovat materiál pomocí šneku do fluidní vrstvy. [5]

### 3.6.7 Odlučovače prachu

Nejpoužívanějšími odlučovači jsou cyklóny různého typu. Jsou jednoduché a spolehlivé. Se zmenšujícím se průměrem odlučivost stoupá, a proto se užívají cyklónové baterie, což je více zapojených úzkých cyklónů paralelně. Pro vyšší požadavky na čistotu vypouštěného plynu se cyklóny zapojují i sériově nebo se používá kapalinová pračka. V případě nebezpečí kondenzace je třeba cyklóny tepelně izolovat, jinak by se mohli zalepit a vyřadit se tak z provozu. Dalšími odlučovači mohou být tkaninové filtry. [5]

## 3.7 Zdroje tepla

Pro předávání tepla sušícímu médiu se užívá dvou způsobů. [5]

### 3.7.1 Nepřímý ohřev

Používá se při sušení za nízkých teplot a při zvýšených požadavcích na čistotu sušícího média, proto se jako sušící médium používá ohřátý vzduch. Jako zdroj tepla se používá výměník tepla či elektrických ohříváků. [5]

#### *3.7.1.1 Uplatnění*

Vzduchem sušíme tyto materiály:

| Sušený materiál | Teplota na vstupu pod roštem (°C) | Sušený materiál | Teplota na vstupu pod roštem (°C) |
|---|---|---|---|
| Piliny | 240 | Obilí | 125-175 |
| Pšenice | 73-110 | Žito | 73 |
| Uhlí | 120-150 | Benzénsulfamid | 100 |
| Močovina | 100 | Manganistan draselný | 180 |
| Zeolit | 25-100 [11] | Zelenina a ovoce [10] [13] | 60-70 |
| Rýže | 50-70 [12] | Rýže (sušení párou) [15] | 100-150 |

*Tabulka 3.2 Stručný seznam materiálů sušených vzduchem [5] [10] [11] [12] [13] [15]*

a spoustu dalších agro-produktů uvedených v literatuře [14].

### 3.7.2 Směšování vzduchu se spalinami

Sušícím médiem jsou zde horké spaliny, jejichž zdrojem jsou spalovací komory, kde se zároveň spaliny směšují se vzduchem na směs s požadovanou teplotou. [5]

#### *3.7.2.1 Uplatnění*

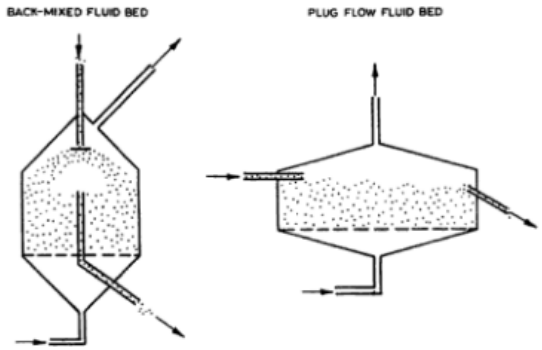
Spalinami sušíme tyto materiály:

| Sušený materiál | Teplota na vstupu pod roštem (°C) | Zdroj sušícího média | Sušený materiál | Teplota na vstupu pod roštem (°C) | Zdroj sušícího média |
|---|---|---|---|---|---|
| Uhlí | 600 | Uhlí | Vulkanický popel | 425 | Zemní plyn |
| Dolomit | 400 | Nafta | NaCl | 200 | Zemní plyn |
| Kcl | 200 | Petrolej | $Na_2SO_4$+$K_2SO_4$ | 600-650 | Petrolej |
| NPK hnojivo | 80-200 | Svítiplyn | Zelená skalice | 400 | Svítiplyn |

*Tabulka 3.3 Stručný seznam materiálů sušených spalinami [5]*

## 3.8 Kontinuální fluidní sušky

Jednotky s kontinuálním sušením jsou obvykle charakterizovány různou dobou zdržení jednotlivých částic uvnitř jednotky. Široké spektrum doby zdržení se dosáhne ve fluidním loži na obr. (3.15) vlevo, ve kterém je poměr délky k šířce samotného fluidního lože relativně malý. Intenzivní míchání uvnitř fluidního lože povede k jednotné teplotě, ale rozdíly doby zdržení částic budou poměrně široké a může tak generovat významnou změnu v obsahu vlhkosti mezi částicemi. Přibližně 40 % produktu zůstává ve fluidním loži méně než polovinu průměrné doby zdržení a některé částice mohou být naopak přesušeny, pokud zůstanou ve fluidním loži příliš dlouho. V souladu s tím bude produkt z fluidního lože mít homogenní obsah vlhkosti pouze tehdy, když se z částic suší primárně povrchová vlhkost. [2]




*Obrázek 3.15 Schéma kontinuálních fluidních sušek [2]*

Díky vynikajícímu přenosu tepla a hmoty mezi sušenými částicemi a sušicím vzduchem bude v podstatě dosaženo rovnováhy mezi odpadním vzduchem a produktem uvnitř fluidního lože. Koncept sušení ve fluidním loži je velmi vhodný pro sušení povrchové vlhkosti, pokud má doba zdržení malý nebo žádný vliv na výkon sušení. Z důvodu širokého rozsahu doby zdržení uvnitř jednotky, je toto fluidní lože obecně nevhodné pro sušení vázané vlhkosti. [2]

Koncept sušení ve fluidním loži na obr. (3.15) vlevo s protiproudým uspořádáním má však ve srovnání s konceptem průtokovým na obr. (3.15) vpravo jednu významnou výhodu. Toto fluidní lože může pojmout vstupní materiál, který není snadno fluidovatelný. To je možné díky intenzivnímu míchání uvnitř fluidního lože. Díky této vlastnosti je koncepce tohoto fluidního lože dobře vhodná jako fáze před sušením v mnoha systémech sušení polymerů. [2]

Úzké rozložení doby zdržení se dosáhne v průtokovém fluidním loži, u kterého je poměr délky k šířce samotného fluidního lože dosti velký. To odpovídá dlouhému nízkému fluidnímu loži uvedenému na obr. (3.15) vpravo. Koncept sušení s průtokovým fluidním ložem je zvláště výhodný, neboť suší vázanou vlhkost z materiálů citlivých na teplo. Doba zdržení je řízena v úzkých mezích a díky velmi malému stupni zpětného toku lze po celé délce jednotky dosáhnout výrazného snížení obsahu vlhkosti. Aby se zajistila správná funkce průtokového fluidního lože, musí být vstupující produkt snadno fluidovatelný. Pokud je materiál příliš mokrý, nemusí dojít ke fluidaci na vstupu. [2]

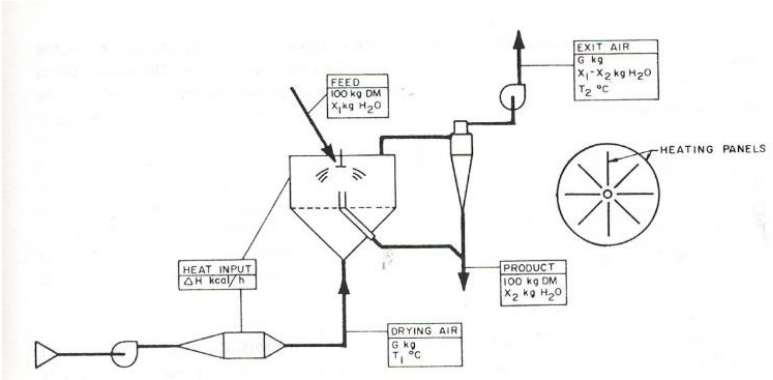
## 3.9 Stacionární fluidní sušky

### 3.9.1 Vsázkové fluidní sušení

Dávkovací sušičky s fluidním ložem se hojně používají pro malou kapacitu produktu, a proto je výhodné postupovat po dávkách z důvodu postupů zajištění kvality, jako ve farmaceutickém průmyslu. Moderní jednotky jsou velmi flexibilní a lze je vybavit sofistikovaným ovládacím zařízením, které plně automatizuje dávkový proces. Vsázkové sušičky s fluidním ložem se často také používají jako míchačky nebo granulátory. [2]

### 3.9.2 Fluidní sušky s rozmetadlem

Obrázek (3.16) ukazuje vývoj sušičky s fluidním ložem, ve které se mokrý materiál může volně mísit se sušeným a částečně vysušeným produktem. Sušící vzduch se zahřívá a vede do přetlakové komory k fluidnímu loži. Rozdělovač vzduchu zajišťuje, že rychlost sušícího vzduchu je v celé fluidní vrstvě stejná a že veškerý materiál je řádně fluidován. Odpadní vzduch se čistí cyklónem a unášené jemné částice z cyklónu se vracejí do proudu sušeného produktu. Strop nad fluidní vrstvou musí být dostatečně vysoký, aby se zabránilo nadměrnému odtrhávání částic. V důsledku těsného kontaktu mezi částicemi a vzduchem těsně nad rozdělovačem vzduchu a rychlým promícháním částic ve fluidní vrstvě se horký sušicí vzduch okamžitě zchladí na teplotu částic a nedochází k přehřívání materiálu. [2]




*Obrázek 3.16 Fluidní suška s rozmetadlem [2]*

Důležitý je řádně designovaný rozdělovač plynu s dostatkem otvorů, aby se zabránilo tzv. mrtvé oblasti ve fluidním loži. Tlakové ztráty na rozdělovači plynu jsou navrženy tak, aby tvořily alespoň 30% tlakové ztráty fluidní vrstvy, aby se zajistilo rovnoměrné rozdělení plynu. [2]

Vlhké materiály nemusí být přímo fluidovatelné, aby mohlo být sušeno ve fluidní sušárně. Proto se malé hrudky materiálu rozmetávají na vršek fluidní vrstvy pomocí rotačního rozmetadla produktu. Vlhké hrudky materiálu se rychle smíchají, a když se smísí s horkými a suchými částicemi, mohou se rozpadnout na původně vyrobené částice, které jsou fluidovatelné. [2]

Přívod látky je namířen ve většině instalací do středu nad ložem tak, aby se mokré pevné látky nedotýkali stěn. S malými rychlostmi dávkování a snadným sušením je možné zavádět materiál bez

rozmetadla produktu, obvykle je však výhodné rozložit přívod rovnoměrně na co nejširší povrchovou plochu fluidního lože. V některých případech není možné touto technikou rozmělnit hrudky, a proto může být nezbytné předsušení materiálu, aby se zabránilo vzniku hrudek v sušeném produktu. [2]

Pokud materiál, který má být sušen, není citlivý na teplotu, může být navržena velmi vysoká vstupní teplota pro sušicí plyn a fluidního lože, včetně rozdělovače vzduchu (zařízení bude postaveno ze žáruvzdorných cihel). [2]

Když jsou však sušeny jemné částice (méně než 300 pm), musí být rychlost sušícího plynu nízká a často se zde vyskytuje horní hranice vstupní teploty plynu. V těchto případech může být fluidní lože značně zmenšeno a ekonomika procesu sušení se může podstatně zlepšit zavedením zdroje tepla do fluidní vrstvy, čímž se minimalizuje potřebné množství sušícího vzduchu. Koeficient přestupu tepla mezi vrstvou fluidovaných částic a topným panelem se stanoví nejlépe pilotním testem sušení, simulujícím podmínky, za kterých průmyslová sušárna pracuje. Také musí být určena maximální přípustná teplota topných panelů. [2]

Obrázek (3.17) ukazuje uspořádání topných panelů, které se nyní značně používají v polymerním průmyslu. Až 86 % tepla je dodáváno z panelů ve fluidním loži. Velikost sušičky s fluidním ložem pro danou aplikaci tedy závisí na jednom nebo více z následujících parametrů:

rychlost sušícího plynu,

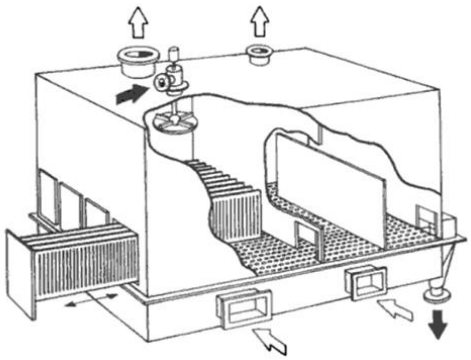
teplota přiváděného plynu,

potřebná teplota produktu,

stupeň nasycení odsávaného vzduchu,

doba zdržení produktu,

druh systému topných panelů. [2]



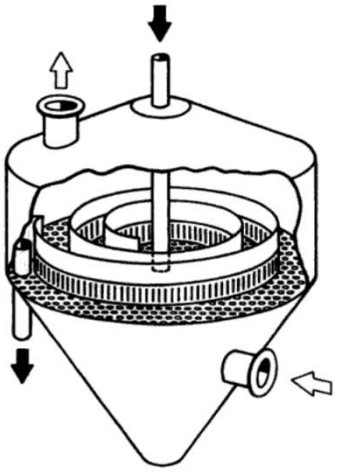
*Obrázek 3.17 Uspořádání topných panelů ve fluidní sušárně [2]*

### 3.9.3 Průtoková spirálová fluidní suška

Fluidní lože s rozmetáváním materiálu není vhodné, pokud je požadován obsah vlhkosti produktu mnohem nižší, než je kritický bod, zejména pokud je požadovaná dlouhá doba sušení. Produkt z fluidního lože s rozmetáváním materiálu je téměř v rovnováze s odpadním vzduchem. To znamená, že vzduch bude muset být udržován na nízké úrovni vlhkosti a to zase povede k velkým požadavkům na sušicí vzduch s doprovázenými zvýšenými náklady na sušení. [2]

Kromě toho budou sušené částice z fluidního lože s rozmetáváním mít velmi odlišné doby zdržení a velká část materiálu bude buď vysušena nebo nedostatečně vysušena. Při sušení materiálu citlivého na teplo bude tedy vysoké riziko poškození produktu. [2]

Aby se překonaly výše uvedená omezení sušičky s rozmetáváním materiálu, je aplikováno průtokové fluidní lože s řízenou dobou zdržení částic. Tento typ sušky je znázorněn na obrázku (3.18).



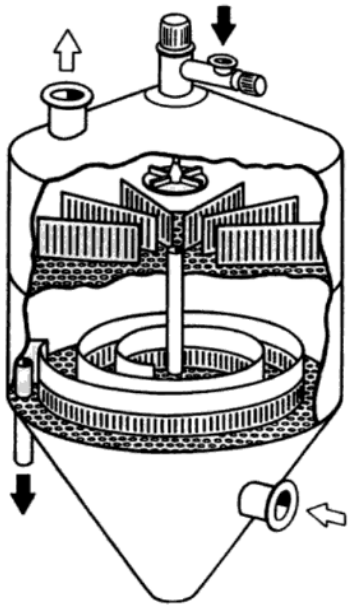
*Obrázek 3.18 Průtoková spirálová fluidní sušárna [2]*

Materiál, který musí být přímo fluidovatelný, se zavádí do středu fluidního lože a sušené částice sledují dlouhou úzkou cestu (podél spirálovitého přepážky) k obvodu fluidního lože, kde je suchý produkt vypouštěn přes jez. Je dosaženo dobré kontroly doby zdržení částic a produkt při vypouštění je téměř v rovnováze s horkým sušicím plynem velmi nízkého obsahu vlhkosti. Zbytkové vlhkosti produktu je dosaženo bez přehřátí materiálu. [2]

Lze také použít obdélníkové sušičky s fluidním ložem. Přitom se dosahuje toku sušených částic pomocí příček uspořádaných příčně. Je však obtížné vyhnout se tzv. mrtvým bodům v rozích, kde produkt zůstane delší dobu. [2]

### 3.9.4 Dvoufázová fluidní suška

Kompaktnější zařízení pro sušení může být navrženo s použitím fluidního lože s rozmetáváním materiálu pro předsušení materiálu, jak je znázorněno pro dvousvazkové fluidní lože na obrázku (3.19). Umístěním fluidního lože s rozmetáváním materiálu na horní část toku ve fluidním loži produkt protéká proti sušícímu vzduchu, tím jsou sníženy nároky na prostory, náklady na instalaci a spotřebu tepla. [2]



*Obrázek 3.19 Dvoufázová fluidní sušárna [2]*

## 3.10 Vibrující fluidní sušky

### 3.10.1 Obecný popis a výhody

Některé granulované produkty je obtížné sušit ve stacionárním fluidním loži kvůli jedné nebo více z následujících fyzikálních vlastností:

široká rozmezí velikosti částic,

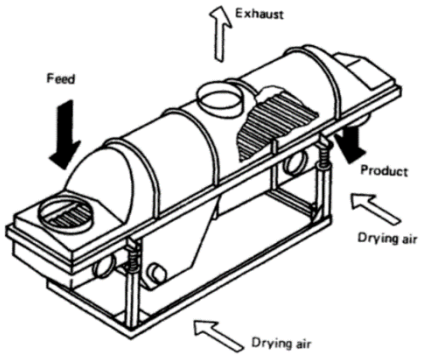
nízká pevnost částic,

lepivost nebo termoplasticita částic,

pastovité vlastnosti vlhkého materiálu. [2]

Široké rozmezí velikosti částic u některých produktů ztěžuje výběr rychlosti sušícího vzduchu ve stacionárních fluidních ložích. Vysoká rychlost, která je nezbytná pro fluidaci větších částic, způsobí, že velká část menších částic bude odtržena z lože, aniž by byla dostatečně vysušena, na druhé straně nízká rychlost nemůže zajistit fluidaci, a tím je omezena doprava větších částic sušičkou a může dojít k tzv. defluidaci. [2]

Výrobky, které mají výše uvedené vlastnosti, je možné sušit pomocí mělkého vibračního fluidního lože, což je obvykle dlouhé obdélníkové koryto kmitající při frekvenci 5 až 25 Hz, jak je znázorněno na obrázku (3.20). Vibrační vektor je aplikován v úhlu (0-45 °) na svislou plochu a materiál je snadno transportován přes sušičku kvůli kombinovanému efektu fluidace a vibrací. [2]




*Obrázek 3.20 Vibrující fluidní sušárna [2]*

Rychlosti vzduchu potřebné k dosažení dobrého pohybu pevných látek přes vibrační fluidní lože jsou malé asi jako 20 % z prahové rychlosti fluidace určené pro daný produkt. Rychlost vzduchu pro fluidaci a sušení tedy může být volena relativně volně v širokém rozmezí, aniž by to ovlivnilo rychlost dopravy a dobu setrvání produktu, která je řízena hlavně úpravou frekvence a směru vibrací. Pokud bude zvolena relativně nízká rychlost sušícího vzduchu, větší částice jsou fluidovány pouze částečně, strhávání menších částic je však sníženo a je dosaženo dobré kontroly doby zdržení menších částic. [2]

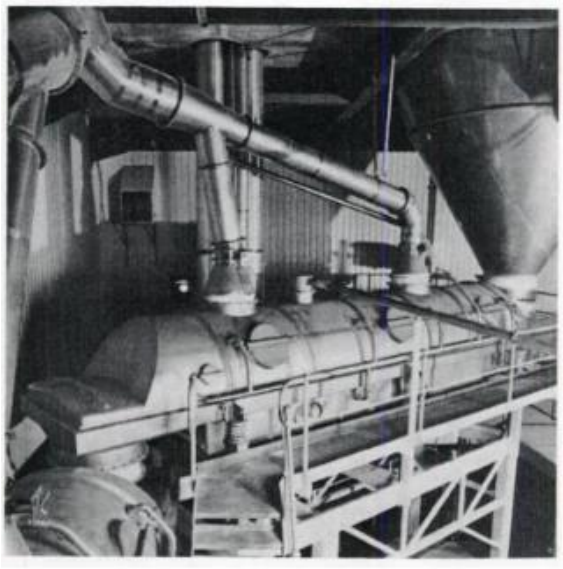
Ve stacionární sušárně s fluidním ložem dochází ve fluidní vrstvě k prudkému promíchávání částic v důsledku probublávání plynu. Proto snadno dojde k odření křehkých částic. Vibrační fluidní lože zajišťuje velmi šetrný transport materiálu přes sušičku. Protože může být zvolena nízká rychlost plynu, nedochází k probublávání ve fluidním loži, což výrazně snižuje opotřebení částic. V důsledku toho může být vibrační fluidní lože použito pro sušení produktů, které mají nízkou mechanickou pevnost, buď v mokrém nebo suchém stavu. [2]

K významnému zlepšení tekutosti částic dojde ve vibračním fluidním loži, protože vibrace rozbíjejí mezičásticové přitažlivé síly, a tím zlepšují kvalitu fluidace. To platí pro materiály skupiny C, a vlhké materiály, které mají tendenci se slepit. [2]

Vibrační sušky s fluidním ložem se dnes značně používají v potravinářském a mlékárenském průmyslu (mléko, syrovátka, kakao a káva) a na obrázku (3.21) je znázorněna průmyslová instalace vibračního fluidního lože, která se používá jako dodatečná sušička pro sušené instantní mléčné výrobky. Tyto druhy produktů jsou obzvláště křehké. Vibrační sušárny s fluidním ložem se používají také pro anorganické soli, granulovaná hnojiva, těžební produkty nebo v případech, kdy dochází k široké distribuci velikosti částic. [2]

| Feature | Group C | Group A | Group B | Group D |
|---|---|---|---|---|
| Distinguishing word or phrase | Cohesive | Aeratable | Bubble readily | Spoutable |
| Example | Flour | Fluid cracking catalyst | Sand | Wheat |
| Particle size | $\leq 20\ \mu m$ | $20 < d_p < 90\ \mu m$ | $90 < d_p < 650\ \mu m$ | $>650\ \mu m$ |
| Channeling | Severe | Little | Negligible | Negligible |
| Spouting | None | None | Shallow beds only | Readily |
| Solids mixing | Very low | High | Medium | Low |

*Tabulka 3.4 Jednotlivé skupiny materiálů určené pro fluidaci*



*Obrázek 3.21 Průmyslová sušárna s vibračním fluidním ložem [2]*

Nedávno byl vyvinut nový typ vícestupňového vibračního fluidního lože na základě gyratorických pohybů, který se obecně používá pro gyratorické prosévače. Použité vibrace jsou výkonnější než obvykle používané ve vibračních suškách s fluidním ložem, a proto lze velmi obtížně fluidovatelné produkty úspěšně vysušit, jako je například uzená rybí moučka. Tato suška snadno umožňuje, aby sušicí komory byly postaveny na sobě, v souladu s tím může být navržena vysoce tepelně účinná a kompaktní vícestupňová suška. [2]

Nedávno byly zveřejněny aplikace vibračního fluidního lože pro sušení čajových listů, krystalů mravenčanu sodného a ganulovaných styrenových polymerů. [2]

Gupta a Mujumdar v přehledu literatury uvádějí, že vibrační fluidní lože je předmětem intenzivního studia v Rusku, pouze 10 % publikovaných článků pochází z anglicky mluvícího světa navzdory všestrannosti a rozšířenému používání této metody sušení. [2]

### 3.10.2 Vlastnosti vibračního fluidního lože

Na základě vizuálních pozorování lze definovat tři režimy provozu vibračního systému v závislosti na velikosti vertikální složky vibračního zrychlení. [2]

Vibrační stav: Když $\omega^2 ag < 1$, lože se chová jako obyčejné fluidní lože a vibrace pouze pomáhají zlepšit stabilitu a homogenitu fluidní vrstvy. [2]

Vibro-fluidní vrstva: Když $\omega^2 ag \cong 1$, jak tok plynu, tak i vibrace přispívají k fluidaci a chování lože je ovlivněno veličinami obou. [2]

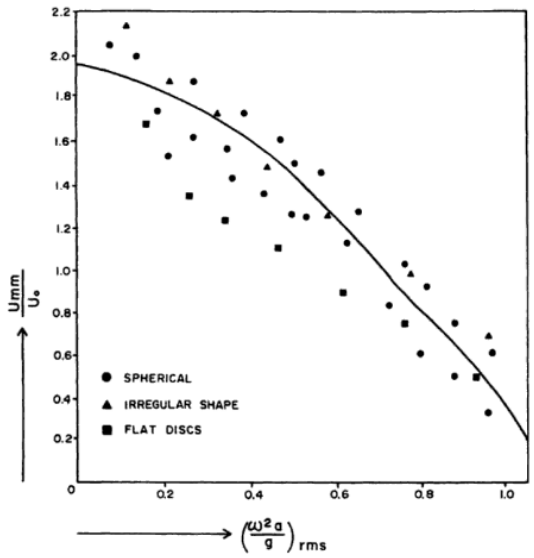
Vibrační fluidní vrstva: Když $\omega^2 ag > 1$, na lože v podstatě působí pouze vibrační síly a vzduch se používá pouze jako médium pro přenos tepla a hmoty. [2]

Je třeba poznamenat, že účinek vibrací se snižuje se zvyšující se výškou lože a výšky lože nad 0,5 m se používají jen zřídka. [2]

Vibrace umožňují plynulý přechod částic z nehybné vrstvy, v důsledku toho je nemožné definovat prahovou rychlost fluidace plynu. Gupta a Mujumdar doporučují používat novou charakteristickou rychlost, kterou nazvali prahová rychlost mísení částic $U_{mm}$, v podstatě to představuje doporučenou

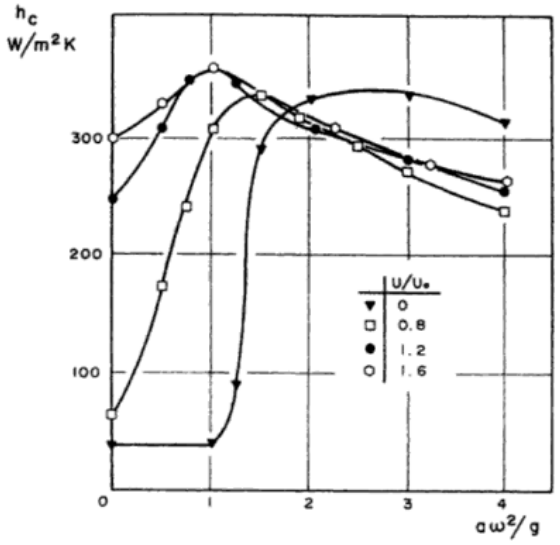
provozní rychlost plynu pro vibrační fluidní lože, ve kterém je oběh pevných látek dostatečně vizuálně silný. [2]

Na obr. (3.22) je znázorněna závislost prahové rychlosti mísení částic pro vibrační fluidní lože s ohledem na změnu zrychlení vibrací. Křivka na obrázku (3.22) je založena pouze na datech z vizuální kontroly a Mujumdar zdůrazňuje, že křivka není obecně platná, obrázek (3.22) však ukazuje, jak může být rychlost plynu snížena při působení vibrací. [2]




*Obrázek 3.22 Závislost prahové rychlosti mísení částic na změně zrychlení vibrací [2]*

Na obr. (3.23) je znázorněno, jak vibrace ovlivňují součinitel přestupu tepla, a to hlavně směšováním pevných látek ve fluidní vrstvě. [2]




*Obrázek 3.23 Závislost koeficientu přestupu tepla na změně zrychlení vibrací [2]*

Koeficient přestupu tepla se zvyšuje, pokud je cirkulace pevných látek zvýšena buď vibracemi, nebo proudem plynu, dokud není vibrační zrychlení příliš vysoké a lůžko tak levituje. Z obrázku (3.23) je dále patrné, že účinek vibrací se snižuje, když se průtok plynu dostane nad hodnotu prahové rychlosti fluidace plynu. [2]

Gupta a kol. studovali vliv vibrací na sušení částic ve vibračním fluidním loži. Zjistili, že k největšímu přenosu hmoty a tepla došlo v prvních několika milimetrech nad distributorem, což odpovídá chování ve stacionárních sušičkách s fluidním ložem. Jejich závěry byly následující:

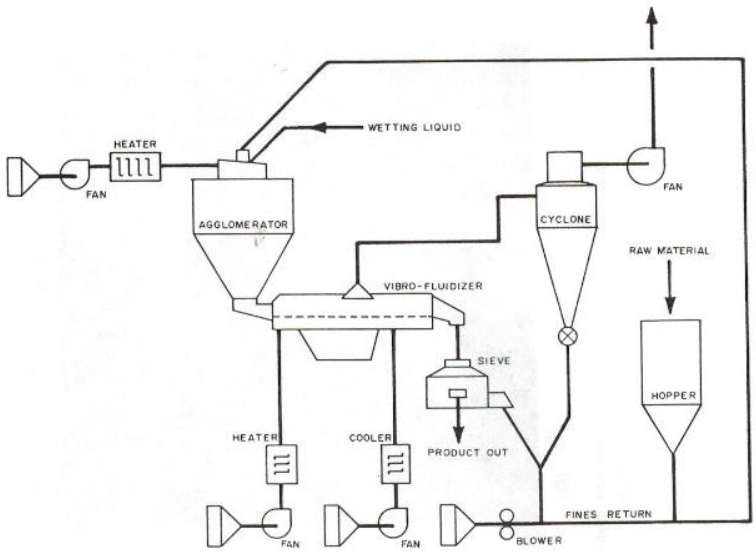
Vibrace nijak neovlivnili kritický obsah vlhkosti v částicích a také nebyl podstatně ovlivněn mechanismus sušení v době poklesu rychlosti sušení. [2]

Při podmínkách sušení při konstantní rychlosti bylo zjištěno, že vibrace snižují rychlost sušení na minimum, když $\omega^2 ag = 1$, další zvýšení zrychlení vibrací opět zvýšilo rychlost sušení, v některých případech nad hodnotu pro stacionární fluidní vrstvu. [2]

### 3.10.3 Sušení aglomerovaných a granulovaných produktů ve vibračním fluidním loži

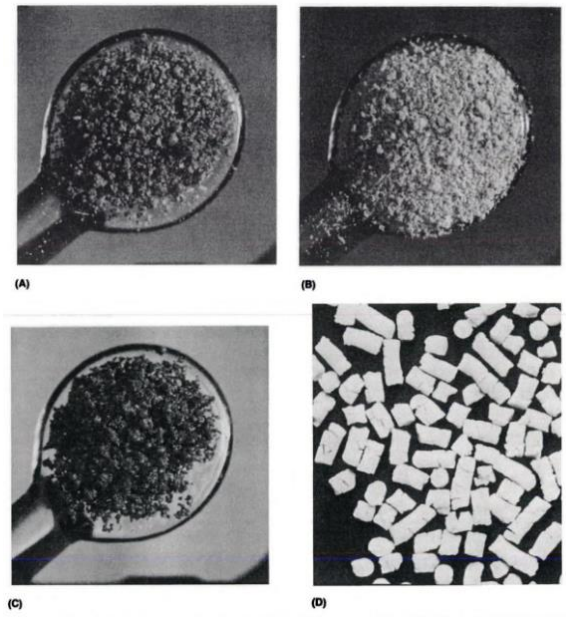
Sušení aglomerovaných nebo granulovaných produktů představuje zvláštní problémy, protože ve vlhkém materiálu jsou částice často lepkavé a musí být jemně sušeny, aby se zajistilo minimální rozpadání aglomerátů. Vibrační fluidní lože je často nejlepší volbou pro sušení takových granulárních materiálů. [2]

Na obrázku (3.24) je znázorněno typické aglomerační zařízení, kde se používá vibračního fluidbního lože jako suška pro vlhký aglomerovaný materiál opouštějící aglomerátor. Oblast fluidního lože v zařízení Vibro-Fluidizer je rozdělena do sekcí se samostatnými komorami s individuální regulací teploty a rychlosti vstupního vzduchu. Je tomu tak proto, že mokrý produkt často umožňuje vyšší rychlost proudění vzduchu pro fluidaci než konečný produkt. Často je nutné stanovit přesnou metodu kontroly teploty produktu během všech fází sušení, pokud se má lepivý nebo termoplastický produkt sušit. Po sušení se aglomerovaný materiál proseje a vyjme se produkt s požadovanou velikostí částic. [2]

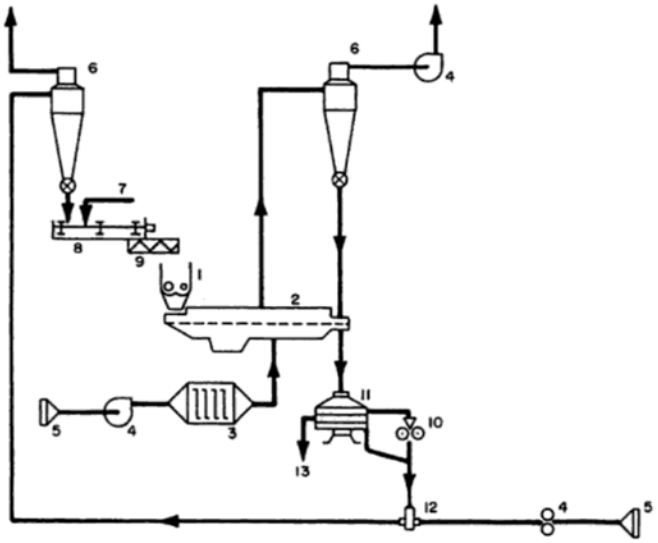



*Obrázek 3.24 Schéma zařízení pro sušení s Vibro-Fluidizerem [2]*

Produkty ze síta a cyklónu jsou vráceny do aglomerátoru pneumatickým dopravováním spolu se surovinou. Typické aglomerované produkty jsou znázorněny na obrázku (3.25). Velké množství potravinářských produktů může být snadno rozpustitelné ve vodě, tzv. instantní produkty. Pro sušení produktů majících pastovitou konzistenci ve vlhkém stavu je nutná granulace materiálu před tím, než se vede do Vibro-Fluidizéru. V některých případech není možné přímo granulovat materiál na částice vhodné pro Vibro-Fluidizér, tak může být určitá část již sušeného materiálu zpětně smíchána, jak je znázorněno na obrázku (3.26). [2]




*Obrázek 3.25 Granulované materiály [2]*

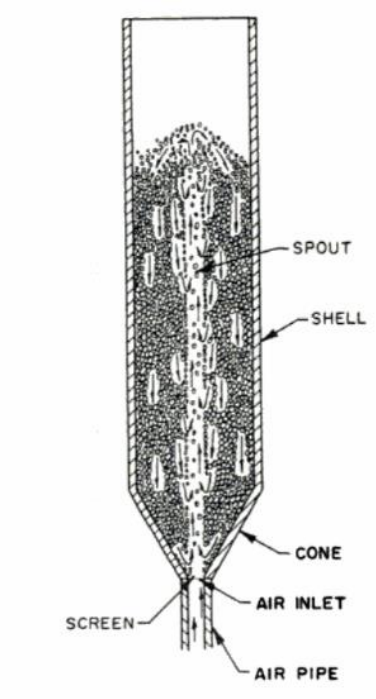



*Obrázek 3.26 Schéma závodu na granulaci, sušení a třídění produktů s pastovitou konzistencí: 1) granulátor, 2) Vibro-Fluidizer, 3) zdroj tepla, 4) ventilátor, 5) vzduchový filtr, 6) cyklón, 7) přívod produktu, 8) míchadlo, 9) podávací zařízení, 10) mlýn, 11) síto, 12) rotační ventil, 13) odvod produktu [2]*

## 3.11 Různé fluidní sušky

### 3.11.1 Fluidní suška bez roštu

Fontánové lože je zvláštní variantou fluidního lože, namísto rovnoměrného rozdělování vzhůru se pohybujícího plynu přes rozdělovač plynu vstoupí plyn jako paprsek do středu kuželové základny komory, jak je znázorněno na obrázku (3.27). Pevné částice jsou rozptýleny a dochází k rychlé výměně tepla a hmoty. Tímto způsobem se vytvoří systematický cyklický pohyb pevných látek. [2]




*Obrázek 3.27 Bezroštová fluidní suška [2]*

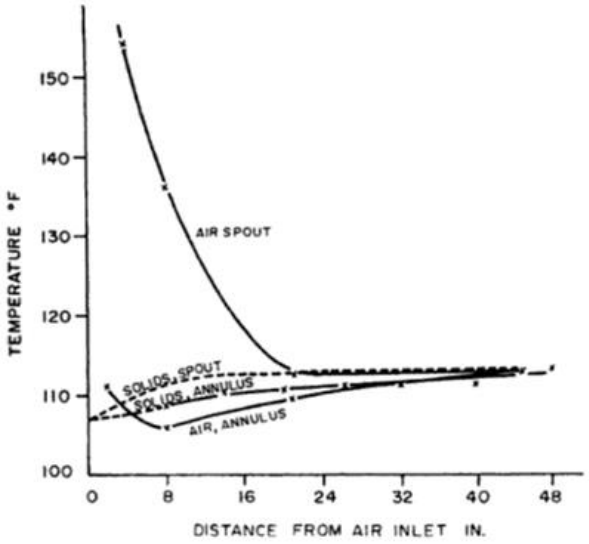
Fontánové lože má speciální výhody ve srovnání s normálním fluidním ložem, kde by fluidace částic větších než 5 mm byla pomalá. Je zde dosaženo dobrého promísení pevných látek a účinného kontaktu plynu s částicemi. Proces byl vyvinut na Národní radě pro výzkum v Kanadě v roce 1954 pro sušení pšenice. Bylo publikováno několik recenzí, které se zabývají mechanikou tekutin fontánového lože a jeho aplikacemi. [2]

Suška s fontánovým ložem je zvláště vhodná pro sušení materiálů citlivých na teplo, jako jsou zemědělské produkty, jako je pšenice a hrášek. Vynikající a kontrolované míchání zrnitého materiálu v rozstřikovaném loži umožňuje použít sušicí plyn s vyšší teplotou. [2]

Tlaková ztráta je asi o třetinu nižší než u podobného fluidního lože, protože zeď komory nese část hmotnosti částic. Tlaková ztráta potřebná k výtoku materiálu je však výrazně vyšší, což je třeba při navrhování ventilátoru pro přívod plynu vzít v úvahu. [2]

Podobně jako prahová rychlost fluidace existuje i minimální rychlost plynu, pod níž nemůže být udržováno fontánové lože, hodnota této rychlosti plynu je však závislá na vlastnostech pevných i kapalných látek a na geometrii lože. [2]

Teploty vzduchu a materiálu během nepřetržitého sušení pšenice ve fontánovém loži byly zaznamenány Mathurem a Oishlerem a tyto profily, znázorněné na obrázku (3.28) ilustrují mechanismus procesu sušení. Z obrázku (3.28) je patrné, že vzestup teploty částic po účinném přenosu tepla a hmoty ve spodní části byl jen o několik stupňů kvůli velké rychlosti recirkulace pevné látky. Většina sušení řízené difuzí vlhkosti probíhalo po krajích zařízení, kde se pevné látky pohybovaly dolů, zatímco se pro sušení uvolňovalo teplo a teplota klesala. [2]

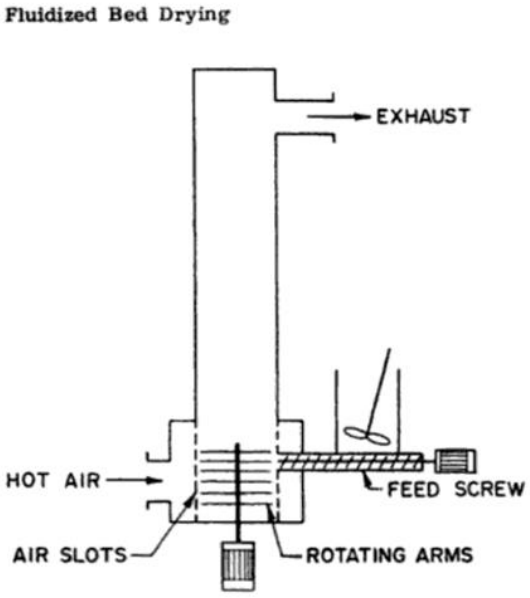



*Obrázek 3.28 Závislost teploty látek při sušení na vzdálenosti od vstupu vzduchu do sušky [2]*

V důsledku toho je možné zabránit přehřátí částic v sušárně a může být použito pro materiál citlivý na teplo, což umožňuje vyšší vstupní teploty plynu, než jaké se používají pro stacionární fluidní lože. Aplikace zůstala omezena na malé kapacity sušáren do 2 tun/h a nevyužil se potenciál pro provoz ve velkém měřítku. [2]

### 3.11.2 Mechanicky míchaná fluidní suška

Sušení mokrých a lepivých materiálů zvyšují energetické náklady potřebných na sušení, a to v jednoduchém jednostupňovém sušení bez vnější recyklace. Pokud se taková pasta nebo koláč, často sestávající z jemných částic, nerozpadají snadno, když se zavádí do sušárny, je možné tyto prášky fluidovat pomoví zavedení mechanického míchadla do napájecí zóny sušárny s fluidním ložem (viz. obr. (3.29), který ukazuje proces vířivé fluidace vyvinutý společností Niro Atomizer). [2]




*Obrázek 3.29 Fluidní suška vybavená míchadlem [2]*

Míchadlo ve spodní části sušárny se otáčí přibližně 100 ot/min a mícháním se rozpadne pastovitý materiál, rozptýlí hrudky do již suchého materiálu a obecně napomáhá fluidaci jemných částic.

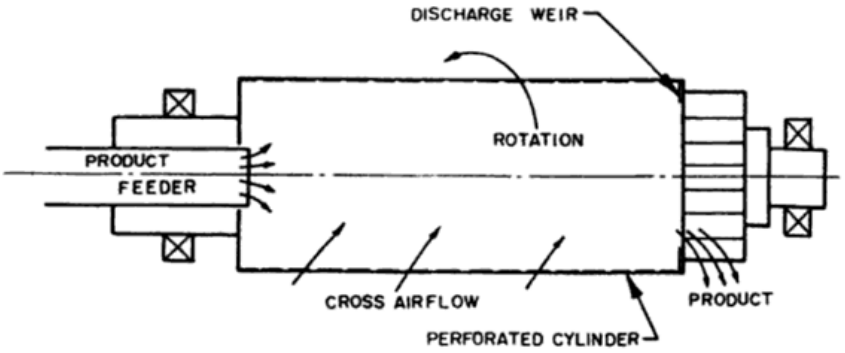
Sušící plyn se zavádí vzduchovými štěrbinami na boku spodní části vrstvy. Průměrná doba setrvání částic může být řízena rychlostí plynu v komoře až do hodnoty 20 minut, což zajišťuje správné sušení produktu. [2]

Pasty a barviva se dnes průmyslově suší v tomto typu sušky, která. Pro sušení těžkých hrudek popsali Ormos a Blickle aplikaci mechanicky míchaného fluidního lože s inertním fluidovatelným materiálem, do kterého se vlhká pasta přivádí a suší. Tento způsob závisí na otěru ve fluidním loži. [2]

### 3.11.3 Odstředivá fluidní suška

Odstředivá suška s fluidním ložem byla vyvinuta pro rychlé sušení lepkavých potravin s vysokým obsahem vlhkosti. Použitelná rychlost plynu může být až 15 m/s, daleko za maximální rychlostí plynu použitou v běžných fluidních vrstvách. Odstředivá suška s fluidním ložem se aplikuje na nakrájenou a nastrouhanou zeleninu, která nemůže být jinak fluidována a běžně se suší na pásových suškách. [2]

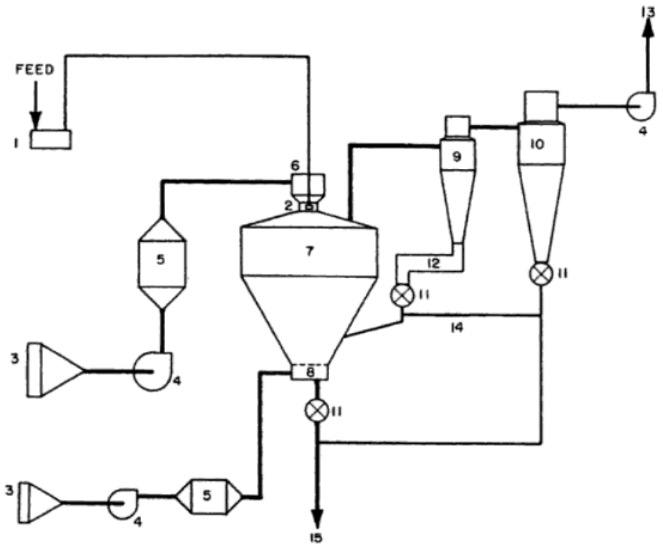
Odstředivá suška s fluidním ložem, znázorněná na obrázku (3.30), sestává z válce s perforovanou stěnou, která se horizontálně otáčí ve vysokorychlostním tepelném příčném proudu vzduchu. Sušený materiál vyplňuje asi 10 až 20 % objemu sušky. Všechny povrchy jsou vystaveny horkému sušícímu vzduchu, bylo pozorováno až pětinásobné zlepšení rychlosti sušení zeleniny a bylo prokázáno, že v odstředivé sušárně s fluidním ložem lze produkovat vysoce kvalitní rýži. [2]




*Obrázek 3.30 Odstředivá fluidní suška [2]*

### 3.11.4 Fluidní rozprašovací suška

Velké množství potravinářských výrobků je hygroskopických a termoplastických, což znesnadňuje sušení rozprašováním, protože je třeba zabránit usazování v sušící komoře. Dále je pro takové aplikace teplota vstupního plynu pro rozprašovací sušku omezená. Byla vyvinuta rozprašovací suška s vestavěným fluidním ložem, která zlepšuje tepelnou účinnost a schopnost rozprašovací sušárny zpracovávat výrobky, které se obtížně suší. Schéma pro fluidní rozprašovací sušku s rozprašovačem je znázorněn na obrázku (3.31).




*Obrázek 3.31 Fluidní suška s rozprašovačem: 1) čerpadlo, 2) rozprašovač, 3) vstup vzduchu, 4) ventilátor 5) ohřívač vzduchu, 6) směšovač, 7) sušící komora, 8) distributor sušícího vzduchu, 9) primární odlučovač, 10) sekundární odlučovač, 11) rotační ventil, 12) dopravník, 13) výstup vzduchu, 14) recyklační systém, 15) odvod ke chlazení po sušení [2]*

Primární horký sušicí plyn je veden do komory kolem trysky, kde je přívod rozprašován. Sekundární sušicí nebo chladicí vzduch, představující přibližně 25 % celkového přiváděného vzduchu je veden do fluidního lože ve dně komory. Některé rozprašované částice se budou shromažďovat ve fluidním loži, zatímco jemnější částice budou strhávány proudem plynů a shromažďovány v cyklonech, z nichž mohou být recirkulovány do sušicí komory pro další aglomeraci. Aglomerace také nastává ve fluidní vrstvě kvůli nárazu částečně vysušených částic a dojde k relativně vysoké interakci mezi postřikem a fluidní vrstvou. Tato interakce je řízena podmínkami procesu, jako jsou teploty fluidní vrstvy a výfukových plynů, stupeň atomizace a rychlost fluidačních plynů. Tímto způsobem se dosáhne velmi účinného využití objemu komory. [2]

## 3.12 Návrh fluidní sušky

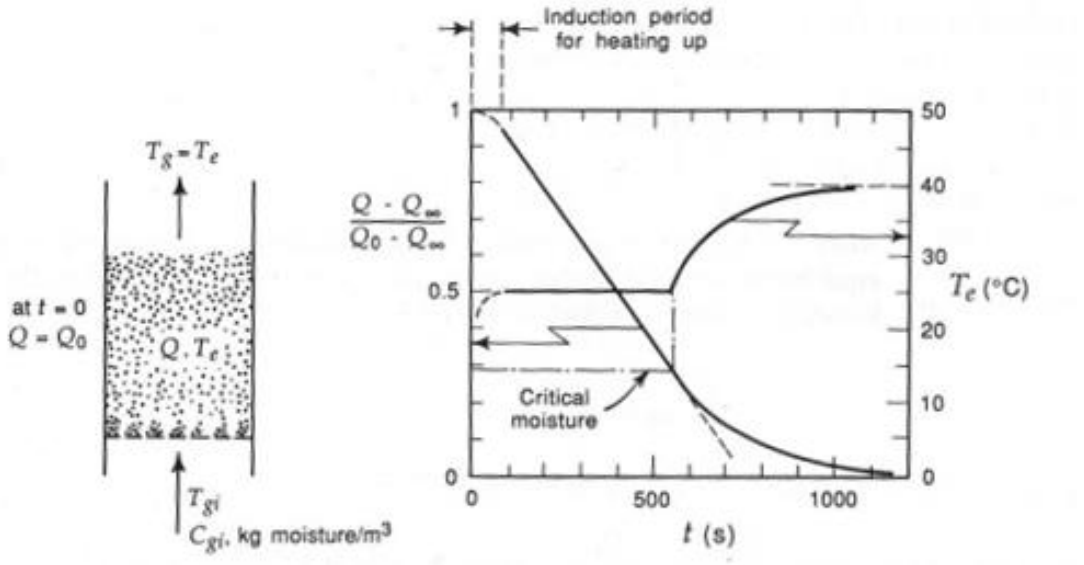
### 3.12.1 Vsázkové sušárny

Proces sušení ve fluidních vrstvách je mnohem složitější než přenos tepla nebo samotný přenos hmoty. Sušící režimy mohou ovlivňovat různé mechanismy. Rozeznáváme dva odlišné režimy sušení, běžně nazývané režimy s konstantní a klesající rychlostí sušení. [1]

#### *3.12.1.1 Režim s konstantní rychlostí sušení*

Máme dávku pevných látek s vlhkostí Q (kg vlhkosti / kg suché pevné látky), která se suší průchodem horkého vzduchu při teplotě $T_{gi}$ nahoru přes vrstvu, jak je znázorněno na obr. (3.32). Pokud jsou pevné látky malé, velmi porézní a dostatečně vlhké, aby obsahovali volnou vlhkost, pak budou sušeny konstantní rychlostí sušení. V této fázi je přenos tepla i hmoty rovnovážný a rychlý, takže vrstva materiálu a odpadní plyn zůstanou blízko teplotě vstupujícího proudu plynu. Velmi porézní pevné látky, jako je silikagel a aktivní uhlí, vykazují tento typ chování při procesu sušení. [1]

(teplo odevzdané vstupním plynem) = (teplo přenesené na pevné látky za účelem odpařování kapaliny)




*Obrázek 3.32 Sušící křivka fluidního sušení [1]*

Změna obsahu vlhkosti pevných látek v čase se zjistí z energetické bilance, pokud $\mathcal{L}$ je teplo odpařování, potom

$$A_t \rho_g u_o C_{pg}\left(T_{gi} - T_e\right)dt = -A_t \rho_{solid} L_m (1 - \varepsilon_m)\mathcal{L}dQ \,. \tag{3.8}$$

Pokud je podíl vlhkosti v částicích větší než kritická hodnota, zůstává rychlost sušení konstantní a integrace rovnice (3.8) dává

$$Q_o - Q = \frac{\rho_g}{\rho_{solid}} \frac{C_{pg}\left(T_{gi} - T_e\right)}{\mathcal{L}} \frac{t}{\frac{(1 - \varepsilon_m)L_m}{u_o}}, Q_o > Q > Q_{cr} \,, \tag{3.9}$$

kde $Q_{cr}$ je kritická hodnota vlhkosti, pod kterou rychlost sušení začíná klesat kvůli difuzním účinkům. Pro jemné porézní pevné látky je $Q_{cr}$ velmi blízko hodnotě vlhkosti v rovnováze s proudem vstupujícího plynu. U těchto pevných látek bude rychlost sušení v podstatě konstantní po celou dobu sušení. Rychlost změny vlhkosti částic se tedy mění s rychlostí plynu a nepřímo s výškou lože. [1]

### *3.12.1.2 Režim s klesající rychlostí sušení*

U pryskyřic a jiných materiálů, u kterých jsou těkavé složky vázány uvnitř nebo u silně mokrých částic, může být difúze vlhkosti na povrch velmi pomalá. Podívejme se, jak se vlhkost mění s časem pro tento režim. [1]

Difúze vlhkosti ve sférické částici o průměru $d_p = 2R$ se řídí Fourierovým zákonem a

$$\frac{\partial Q_m}{\partial t} = \mathcal{D}_m \left( \frac{\partial^2 Q_m}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial Q_m}{\partial r} \right), \tag{3.10}$$

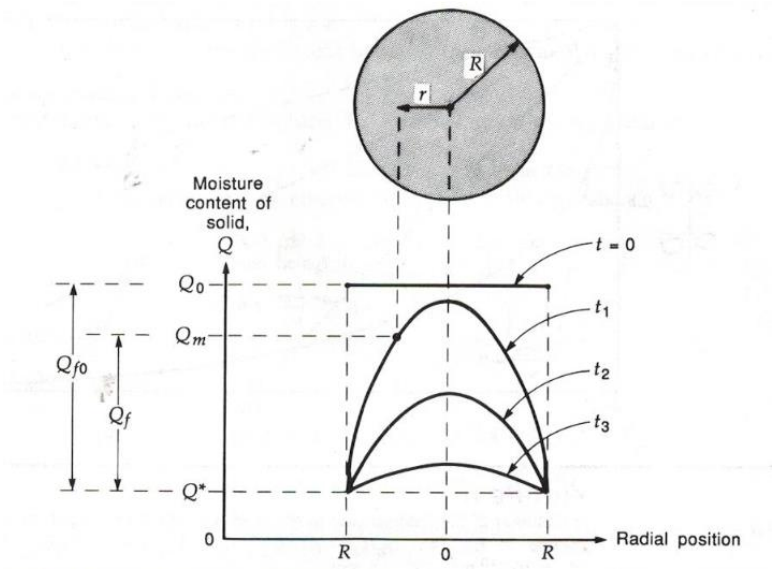
kde $Q_m$ je hodnota vlhkosti v libovolné poloze $r$ a $\mathcal{D}_m$ je difuzivita vlhkosti uvnitř částice. Okrajové podmínky pro tento proces jsou následující:

$$t = 0, každé\ r, Q_m = Q_o\ ,$$

$$t = t, \begin{cases} r = 0, & \dfrac{\partial Q_m}{\partial r} = 0 \\ r = R, & Q_m = Q^* \end{cases},$$

kde $Q^*$ je hodnota vlhkosti na povrchu částice, která by byla v rovnováze s plynem, který částici obklopuje viz. obr. (3.33). Průměrný obsah vlhkosti v částici je dále

$$Q = \int_0^R \frac{4\pi^2 Q_m dr}{(4/3)\pi R^3}. \tag{3.11}$$




*Obrázek 3.33 Vlhkost částice v závislosti na vzdálenosti od středu částice [1]*

Řešení předchozích rovnic dává

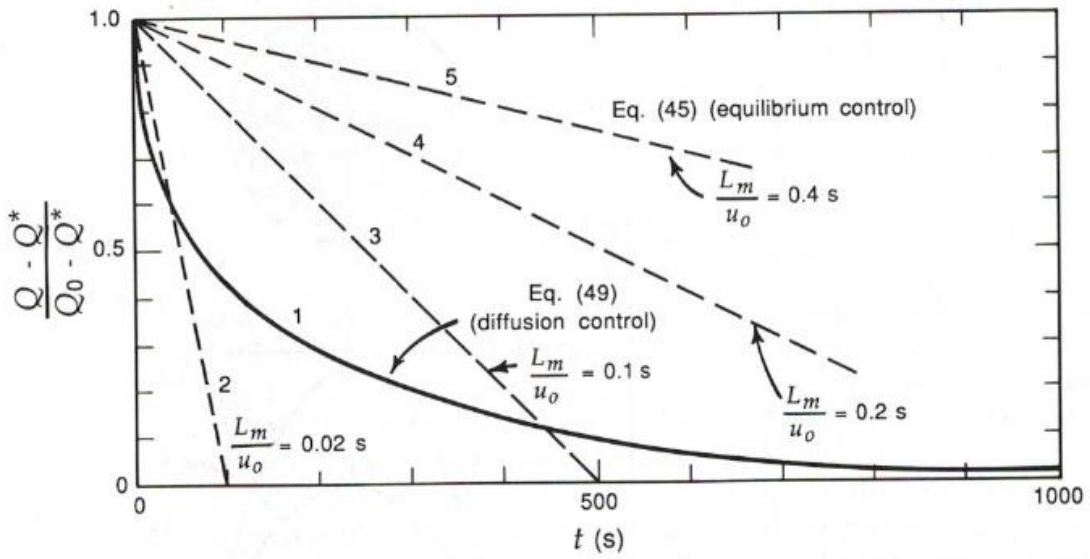
$$\frac{Q - Q^*}{Q_0 - Q^*} = \frac{Q_f}{Q_{f0}} = \frac{6}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2} exp\left[-(n\pi)^2 \frac{\mathcal{D}_m t}{R^2}\right]. \tag{3.12}$$

### *3.12.1.3 Vliv kritické vlhkosti.*

Obrázek (3.34) ilustruje oba režimy, pokud se vyskytují jednotlivě, a ukazuje, jak se jednotlivé režimy můžou v konkrétním sušícím procesu posunout z jednoho na druhý. Pro případ s hlubokým ložem $\frac{L_m}{u_o} = 0{,}2s$ je rovnovážný proces 4 pomalejší než proces difúze 1, řídí tedy celkovou rychlost sušení. Na druhé straně, pro případ s mělkým ložem $\frac{L_m}{u_o} = 0{,}02s$, je difúzní proces 1 pomalejší než rovnovážný proces 2. Pro přechodové podmínky, kde $\frac{L_m}{u_o} = 0{,}1s$, může sušení začít jako řízené rovnovážně (proces 3), nicméně, u $t = 400s$ je proces ovlivňován difúzí a později řízen difúzí.

Obrázek (3.34) ukazuje, že kritický obsah vlhkosti je zhruba dán vztahem

$$\frac{Q_{cr} - Q^*}{Q_0 - Q^*} \cong 0{,}1\ pro\ \frac{L_m}{u_o} = 0{,}1s\ . \tag{3.13}$$




*Obrázek 3.34 Znázornění obou režimů sušení [1]*

Při zaměření pozornosti na jednu sušicí částici zjistíme, že kritického obsahu vlhkosti je dosaženo, když tlak par na povrchu klesne pod tlak par nasycené kapaliny v proudu sušícího plynu. Navíc, teoretická analýza podmínek konstantního suchého stavu ukazuje, že $Q_{cr}$ je malé pro vysoké $\mathcal{D}_m$, malé $d_p$ a pomalé sušení. [1]

### 3.12.2 Kontinuální sušení

V jakémkoli okamžiku během dávkového sušení jsou všechny pevné látky ve stejné fázi sušení. Situace je zcela odlišná v nepřetržitých provozech, protože zde máme malé množství více či méně vlhkých částic rozptýlených v loži s téměř suchými částicemi. Teplota suché a mokré pevné látky se může lišit a interakce mezi částicemi může více či méně ovlivňovat sušící proces. Tyto faktory naznačují, že proces sušení se může v obou případech výrazně lišit. [1]

Zaměřme se na jednu mokrou částici o teplotě $T_p$ obklopenou plynem o koncentraci par $C_e$. Vzhledem k tomu, že pravděpodobnost obklopení částice horkým plynem je velmi malá, předpokládáme, že je částice přítomna v emulzi po celou dobu a že její rychlost sušení je určena jeho interakcí s emulzí a jejími sousedícími téměř suchými částicemi o teplotě Te. [1]

Rychlost sušení této typické částice o velikosti $d_p$ může být reprezentována jako

(pokles volné vlhkosti v částici) = (hmota přenesená z mokré částice do sousední emulzní tekutiny) = (teplo přenesené ze sousedních pevných látek / latentní teplo odpařování).

Z hlediska vlhkosti $Q_f = Q - Q^*$ se tato rovnice stává

$$-\left(\frac{\pi}{6}d_p^3\right)\rho_{solid}dQ_f = \pi d_p^2 k_d\left(C_p^* - C_e\right)dt = \frac{\pi d_p^2 h_p\left(T_e - T_p\right)dt}{\mathcal{L}}, \tag{3.14}$$

kde $C_p^* = f\left(Q_f, T_p\right)$ je koncentrace páry v rovnováze s obsahem vlhkosti na povrchu pevné látky, $k_d$ koeficient přenosu hmoty, $h_p$ je koeficient přenosu tepla mezi částicemi o teplotě $T_p$ a emulzí o teplotě $T_e$. [1]

Teplota emulze $T_e$ je získána z energetické bilance:

(teplo přenesené na emulzi) = (teplo ze vstupního plynu o teplotě $T_{gi}$) + (teplo z trubek výměníku) = (teplo potřebné ke zvýšení teploty a odpařování kapaliny v pevných látkách) + (teplo ke zvýšení teploty pevných látek) + (tepelná ztráta),

která se stává

$$\begin{aligned} & A_t u_o \rho_g C_{pg}\left(T_{gi} - T_e\right) + q_h \\ &= F_0\left(Q_{fi} - \overline{Q_f}\right)\left[\mathcal{L} + C_{pl}\left(T_e - T_{pi}\right)\right] \\ &+ F_0 C_{psolid}\left(T_e - T_{pi}\right) + q_1 \,. \end{aligned} \tag{3.15}$$

Pro velmi vlhké látky, téměř suché zbylé pevné látky, žádné tepelné ztráty a s žádným tepelným vstupem tepla se rovnice (3.15) zjednodušuje na

$$T_e = T_{gi} - \frac{F_0 Q_{fi} \mathcal{L}}{A_t u_o \rho_g C_{pg}}. \tag{3.16}$$

Rovnice (3.15) a (3.16) ukazují, jak lze nastavit nebo regulovat teplotu lože. Za daných fluidačních podmínek tedy může být teplota lože zvýšena snížením rychlosti přívodu pevných látek $F_o$ nebo přidáním tepla do lože. Kromě toho, rovnice (3.14) ukazuje, že zvýšení teploty lože zvyšuje rychlost sušení mokrých částic uvnitř lože, čímž se snižuje nezbytná doba sušení. [1]

S tímto jednoduchým modelem pro interakci sušených částic sledujeme průběh sušení částice v loži a zjistíme chování lože jako celku během nepřetržitých operací. Zaprvé, změna hodnoty vlhkosti s časem jednotlivé částice v loži se zjistí z rovnice (3.14):

$$-dQ_f = \frac{6h_p\left(T_e - T_p\right)dt}{\rho_{solid} d_p \mathcal{L}}. \tag{3.17}$$

Pro sušení jednotlivých částic v konstantním režimu zůstávají tyto částice při konstantní teplotě blízké teplotě mokrého teploměru emulze. Postup sušení jednotlivé částice se tedy získá integrací rovnice (3.17) pro konstantní $\Delta T$ a pro $Q_f = Q_{fi}\ při\ t = 0$:

$$\frac{Q_f}{Q_{fi}} = 1 - \frac{t}{\tau}, \tag{3.18}$$

kde

$$\tau = \frac{\rho_{solid} d_p Q_{fi} \mathcal{L}}{6h_p\left(T_e - T_p\right)} \tag{3.19}$$

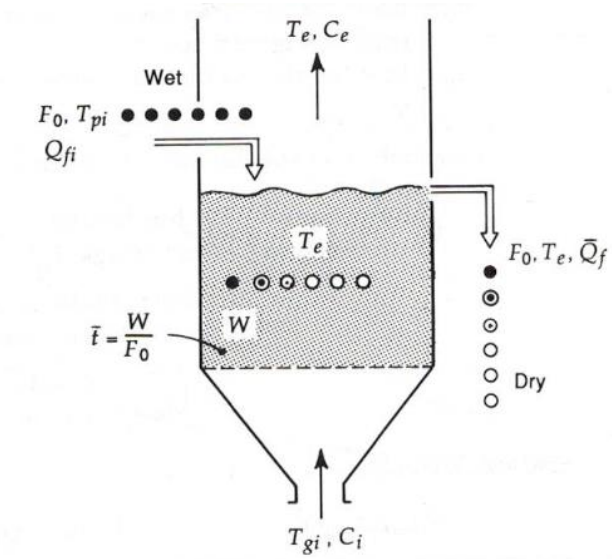
je čas potřebný k úplnému vysušení částice. [1]

Pokud máme lože na obr. (3.35), rozložení doby pobytu částice je

$$E(t) = \frac{1}{\bar{t}} e^{-t/\bar{t}}\,, \tag{3.20}$$

kde

$$\bar{t} = \frac{W}{F_0}\,. \tag{3.21}$$




*Obrázek 3.35 Znázornění veličin při kontinuálním sušení [1]*

Průměrná hodnota vlhkosti odcházející v pevné látce $\overline{Q_f}$ je také definována

$$\overline{Q_f} = \int_0^{\tau} Q_f E(t) dt\,. \tag{3.22}$$

Kombinace rovnic (3.18), (3.20) a (3.22) a integrace od t = 0 do t = $\tau$, a protože obsah vlhkosti je nulový pro všechny délky pobytu větší než $\tau$, dává

$$\frac{\overline{Q_f}}{Q_{fi}} = 1 - \frac{1 - e^{-\frac{\tau}{\bar{t}}}}{\frac{\tau}{\bar{t}}}\,. \tag{3.23}$$

Tam, kde difúze vlhkosti omezuje rychlost sušení, teplota sušicí částice stoupá s časem, a to lze přiblížit

$$T_e = T_p \alpha e^{-B't}\,, \tag{3.24}$$

kde konstanta $B'$ je komplexní funkcí podmínek sušení pro fluidní vrstvu. Pro lože jako celek se střední podíl vlhkosti odcházející z pevné látky najde nahrazením (v případě, že $\tau = \infty$) a integrací. To dává

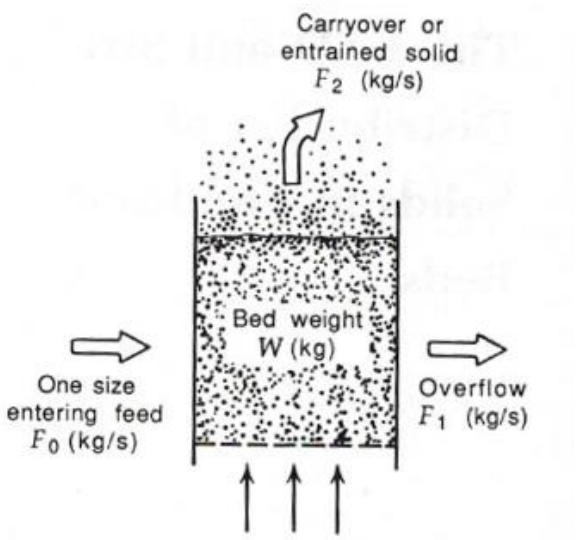
$$\frac{\overline{Q_f}}{Q_{fi}} = \frac{1}{1 + B'\bar{t}} \,. \tag{3.25}$$

### 3.12.3 Vliv širokého rozmezí velikosti pevných látek

Pokud se materiál vyznačuje širokým rozmezím velikosti částic včetně malých pevných látek, které jsou strhávány proudem plynu, musí být zváženy různé další faktory. Zaprvé, když se unášené produkty nevrátí do lože, zjistíme že průměrná doba setrvání pro různé velikosti pevných látek v loži je

$$\bar{t}(dp) = \frac{1}{\frac{F_1}{W} + \kappa(dp)}, \tag{3.26}$$

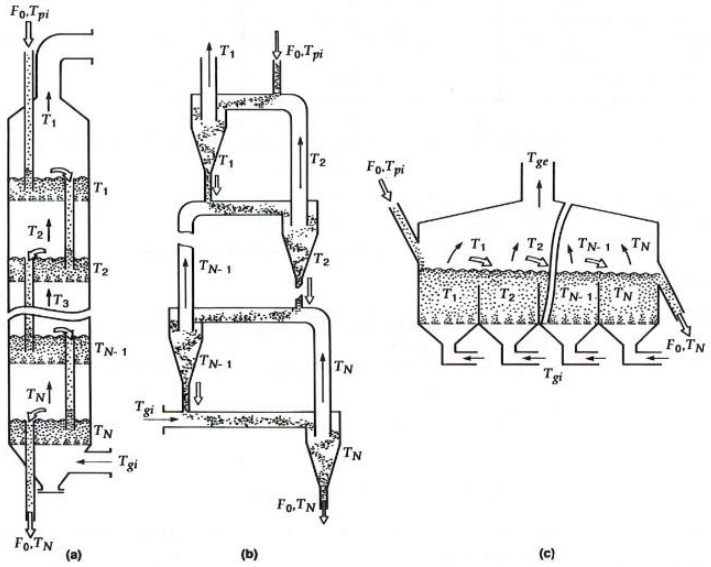
kde $F_1$ je hmotnostní průtok protečených pevných látek, jak je znázorněno na obr. (3.36). [1]




*Obrázek 3.36 Bilance hmotnostních toků [1]*

### 3.12.4 Poznámky

I když průměrný obsah vlhkosti v odcházejících pevných látkách může být velmi nízký, proud z jednostupňové sušičky nevyhnutelně obsahuje malou frakci velmi vlhkých částic. U procesů, kde je důležitá pouze průměrná vlhkost, mohou být jednostupňové operace docela uspokojivé. Avšak pro procesy, u kterých je požadován stejný obsah vlhkosti v celém objemu lože, jako je například výroba syntetických vláken, může být obsah těchto několika vlhkých částic škodlivý. Pro tento požadavek by se mělo použít vícestupňového vylepšení, aby se zlepšilo rozdělení doby zdržení pevných látek. Protože jde zvláště o rozsah doby setrvání pevných látek, nikoli plynu, může být použito jedno z vícestupňových schémat na obr. (3.37). Z důvodu jednoduchosti konstrukce, jednoduché regulace proudu plynu a nižší spotřebě energie se pro tyto sušící operace doporučuje schéma obr. (3.37c). [1]




*Obrázek 3.37 Různé provedení fluidních sušek [1]*

Pokud je pro sušení zapotřebí značného přivedeného tepla, lze použít vnitřní ohřívače. Ty redukují velikost potřebnou pro lože, cyklóny a systému sběru pevných látek. [1]

Fluidní sušky mohou být použity k získání cenných rozpouštědel z granulárních nebo práškových materiálů prouděním skrz lože přehřátou párou nebo přehřátou párou samotného rozpouštědla. [1]

Při fluidním sušení by měla být věnována pozornost nebezpečí výbuchu. U hořlavých materiálů by měly být nainstalovány protrhávací kotouče a obsah kyslíku by měl být pečlivě kontrolován, aby zůstal mimo limity výbuchu. Protože statické náboje nahromaděné jemnými částkami mohou způsobit vznícení, je důležité uzemnit všechny vnitřní kovové části systému, a pokud se pro proudění skrz lože používají hořlavé páry, měly by být přívodní a vypouštěcí sekce pečlivě a správně utěsněny. [1]

# 4 Fluidace materiálu, experiment

## 4.1 Popis zařízení

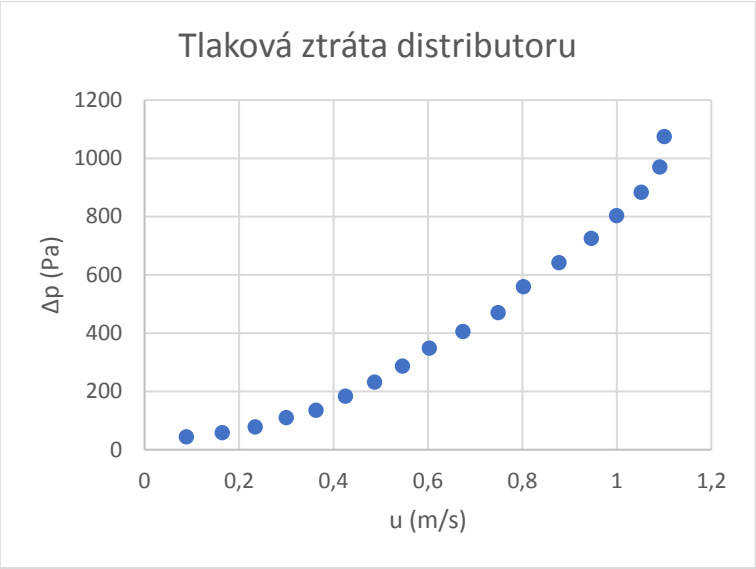
*Obrázek 4.1 Zařízení pro měření fluidních charakteristik*

Zařízení pro měření fluidních charakteristik se skládá z ventilátoru, potrubního systému, spodní nádoby pro přívod vzduchu o rozměrech 235x160x600 mm. Horní nádoba o rozměrech 235x160x1000 mm je přišroubovaná k dolní nádobě. Stěny nádob mají tloušťku 5 mm. Uvnitř mezi oběma nádobami se nachází distributor vzduchu o rozměrech 221x146 mm a je uložen mezi přírubami obou nádob. Horní nádoba má ve spodní části otvor pro vyjmutí zkoušeného materiálu, shora je utěsněna přišroubovaným víkem a v horní části spojena otvorem s cyklónem pro ukládání pevných částic při úletu. Horní nádoba je dále vybavena sondou pro snímání měřených veličin. Vyhodnocování měření probíhá v programu LabView 2018. Měření probíhala při atmosférickém tlaku při teplotě cca 15°C, hodnota viskozity vzduchu pro výpočty se odečetla z [34] a hustota vzduchu se odečetla z [36] pro 15°C.

## 4.2 Postup a vyhodnocení měření

Ventilátorem jsme pouštěli vzduch o průtoku $\dot{V}$ do nádoby. Hodnoty tlakové ztráty distributoru a fluidní vrstvy $\Delta p_c$, rychlosti proudění vzduchu u a průtoku $\dot{V}$ byly vyhodnoceny pomocí programu LabView 2018. V prostředí LabView jsme mohli měnit frekvenci ventilátoru a tím i průtok $\dot{V}$. Postupně jsme zvyšovali frekvenci od 6 Hz do 40 Hz a poté zase snižovali. Pomocí naměřených hodnot jsme mohli dále vyhodnocovat experiment.

Nejdříve jsme měřili naprázdno, tj. bez materiálu, abychom určili tlakovou ztrátu distributoru.




*Obrázek 4.2 Tlaková ztráta distributoru*

Měření naprázdno je velmi důležité pro vyhodnocování při následujících měřeních, neboť zařízení měří celkovou tlakovou ztrátu $\Delta p_c = \Delta p_d + \Delta p$. Pro určení tlakové ztráty fluidní vrstvy $\Delta p_b$ je tedy nutné odečíst tlakovou ztrátu distributoru od celkové. Pro určení prahové rychlosti fluidace je nutné rozdělit charakteristiku na dvě části: rostoucí a ustálenou. Hodnoty každé části proložíme lineární křivkou. Prahová rychlost fluidace je x-ová souřadnice na průsečíku obou přímek. Vyřešením soustavy rovnic dostaneme prahovou rychlost fluidace $u_{mf}$. Pro různé materiály vždy pro 3,1 kg jsme naměřili hodnoty tlakových ztrát a rychlostí vzduchu. Další měření pro různé materiály jsme prováděli se stejným objemem 2,7 l.

### 4.2.1 Výsledky experimentů

V zařízení jsme fluidovali křemenné písky, keramzity a popel.

*Obrázek 4.3 Křemenný písek v rozmezí 0,1 až 0,6 mm*

*Obrázek 4.4 Křemenný písek v rozmezí 0,3 až 0,8 mm*

*Obrázek 4.5 Křemenný písek v rozmezí 0,3 až 3 mm*

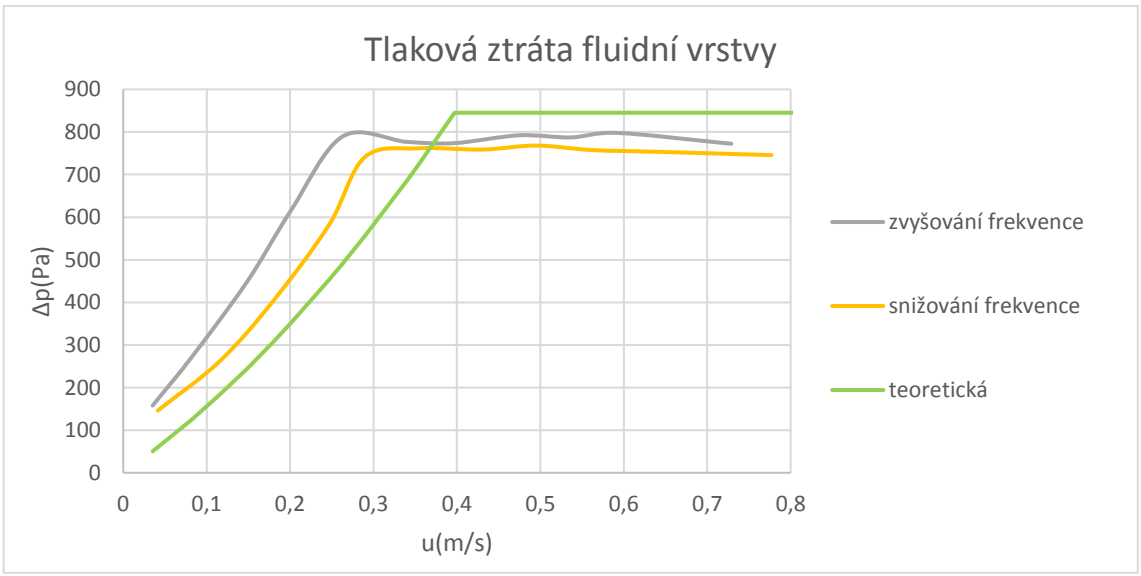
*Obrázek 4.6 Křemenný písek v rozmezí 0,5 až 1 mm*

*Obrázek 4.7 Keramzit v rozmezí do 2 mm*

*Obrázek 4.8 Keramzit v rozmezí 2 až 4 mm*

*Obrázek 4.9 Popel s vysokým obsahem železa*

Na obr. (4.10) je uvedeno vyhodnocení pro měření 3,1 kg keramzitu s rozměry zrn do 2 mm. Detailní výsledky měření pro další materiály jsou uvedeny v příloze (8.1) Vyhodnocení měření pro 3,1 kg materiálu a v příloze (8.2) Vyhodnocení měření pro 2,7 l materiálu.




*Obrázek 4.10 Vyhodnocení měření pro 3,1 kg keramzitu s rozměry zrn do 2 mm*

V tabulkách (4.1) a (4.2) jsou uvedeny výsledky experimentu.

| měření při 3,1 kg | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | písky | | | | keramzity | | popel (vysoký obsah železa) |
| materiál v rozmezí (mm) | 0,1-0,6 | 0,3-0,8 | 0,3-3,0 | 0,5-1,0 | 0-2 | 2-4 | - |
| hustota (kg/m3) | 2500 | 2500 | 2500 | 2500 | 1050 | 850 | 1800 |
| sypná hmotnost (kg/m3) | 1413 | 1413 | 1413 | 1351 | 575 | 450 | 919 |
| mezerovitost (-) | 0,435 | 0,435 | 0,435 | 0,460 | 0,452 | 0,471 | 0,490 |
| sféricita (-) | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,95 | 0,95 | 0,8 |
| střední průměr (mm) | 0,41 | 0,52 | 0,8 | 0,77 | 1,034 | 2,648 | 0,55 |
| prahová rychlost fluidace (m/s) | 0,14 | 0,23 | 0,329 | 0,324 | 0,29 | 0,613 | 0,483 |
| tlaková ztráta fluidní vrstvy (Pa) | 689 | 727 | 727 | 710 | 770 | 815 | 812 |

*Tabulka 4.1 Výsledky experimentu pro 3,1 kg materiálu*

| měření při 2,7 l | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | písky | | | keramzity |
| materiál v rozmezí (mm) | 0,1-0,6 | 0,3-3,0 | 0,5-1,0 | 0-2 |
| hustota (kg/m3) | 2500 | 2500 | 2500 | 1050 |
| sypná hmotnost (kg/m3) | 1413 | 1413 | 1351 | 575 |
| mezerovitost (-) | 0,435 | 0,435 | 0,460 | 0,452 |
| sféricita (-) | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,95 |
| střední průměr (mm) | 0,41 | 0,8 | 0,77 | 1,034 |
| prahová rychlost fluidace (m/s) | 0,147 | 0,282 | 0,299 | 0,303 |
| tlaková ztráta fluidní vrstvy v rozmezí (Pa) | 994 | 1070 | 950 | 770 |

*Tabulka 4.2 Výsledky experimentu pro 2,7 l materiálu*

## 4.3 Teoretické vyhodnocení

Teoretickou hodnotu tlakové ztráty fluidní vrstvy spočítáme ze dvou vztahů. Tlaková ztráta závisí na rychlosti proudění dle tzv. Ergunovy rovnice (4.1) až do ustálení, které je definováno hodnotou z rovnice (4.2). [34]

$$\Delta p = \frac{150 * H * (1-\varepsilon)^2 * \mu}{\varepsilon^3 * \phi^2 * d_p^2} * u + \frac{1{,}75 * H * (1-\varepsilon) * \rho_g}{\varepsilon^3 * \phi * d_p} \cdot u^2 \tag{4.1}$$

$$\Delta p = (1-\varepsilon) * \left(\rho_{solid} * \rho_g\right) * g * H \tag{4.2}$$

Teoretickou hodnotu prahové rychlosti fluidace spočítáme ze třech následujících rovnic. [34]

$$\frac{1{,}75}{\varepsilon^3 \cdot \phi} \cdot Re^2 + \frac{150 \cdot (1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 \cdot \phi^2} \cdot Re = A_r \tag{4.3}$$

$$A_r = \frac{d_p^3 \cdot \rho_g \cdot (\rho_{solid} - \rho_g) \cdot g}{\mu^2} \tag{4.4}$$

$$Re = \frac{d_p \cdot u \cdot \rho_g}{\mu} \tag{4.5}$$

Po dosazení do rovnice (4.4) vypočteme Archimedovo číslo. Poté vyřešíme kvadratickou rovnici (4.3) a vypočítáme Reynoldsovo číslo. Po vyjádření rychlosti $u$ z rovnice (4.5) a dosazení spočítáme teoretickou prahovou rychlost fluidace $u_{mft}$. [34]

Hodnota hustoty písků jsou vzaty z [1]. Hustoty keramzitů jsou vzaty z přílohy (8.4). Hustota popela je vzata pouze orientačně z [20]. Sypná hmotnost písků a popela je vypočítána z hmotnosti materiálu, rozměrů fluidní komory a výšky fluidní vrstvy za klidu

$$\rho_{sypná} = \frac{m}{V} = \frac{m}{xyz}. \tag{4.6}$$

Sypná hmotnost vzata z přílohy keramzity liapor (8.4). Mezerovitost materiálů vypočtena z hustoty a sypné hmotnosti

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{solid}}{\rho_{sypná}}. \tag{4.7}$$

Sféricity materiálů jsou vzaty z [20]. Střední průměry písků a popela byli vzaty z předchozích měřeních granulometrie. Střední průměry keramzitů jsou vypočteny z dat propadu z přílohy (8.4).

V tabulce (4.3) jsou uvedeny hodnoty pro výpočet středního průměru částic obou měřených keramzitů. Z dat propadu jsem určil hmotnostní podíl materiálu, který nepropadl na daném intervalu mezi dvěma po sobě následujícími síty a střední průměr rozměrů mezer na témž intervalu. Střední průměr částice keramzitu se potom vypočítá podle [27] jako

$$d_p = \frac{1}{\sum\left(\frac{hmotnostní\ podíl}{střední\ průměr\ sít}\right)}. \tag{4.8}$$

| | keramzity | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| rozmezí (mm) | 2-4 | 0-2 | 2-4 | 0-2 | 2-4 | 0-2 | 2-4 | 0-2 | 2-4 | 0-2 |
| síta(mm) | Propad (%) | | hmotnostní podíl | | střední průměr sít (mm) | | podíl/průměr | | střední průměr (mm) | |
| 8 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,648 | 1,034 |
| 5,6 | 1 | 1 | 0 | 0 | 6,8 | 6,8 | 0 | 0 | | |
| 4 | 0,95 | 1 | 0,05 | 0 | 4,8 | 4,8 | 0,010 | 0 | | |
| 3 | 0,5 | 1 | 0,45 | 0 | 3,5 | 3,5 | 0,129 | 0 | | |
| 2 | 0,07 | 0,95 | 0,43 | 0,05 | 2,5 | 2,5 | 0,172 | 0,02 | | |
| 1 | 0,01 | 0,25 | 0,06 | 0,7 | 1,5 | 1,5 | 0,04 | 0,467 | | |
| 0,5 | 0,01 | 0,03 | 0 | 0,22 | 0,75 | 0,75 | 0 | 0,293 | | |
| 0,25 | 0 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,375 | 0,375 | 0,027 | 0,027 | | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0,02 | 0,125 | 0,125 | 0 | 0,16 | | |

*Tabulka 4.3 Tabulka výsledků z propadu*

## 4.4 Výsledky teoretického výpočtu s porovnáním výsledků z experimentu

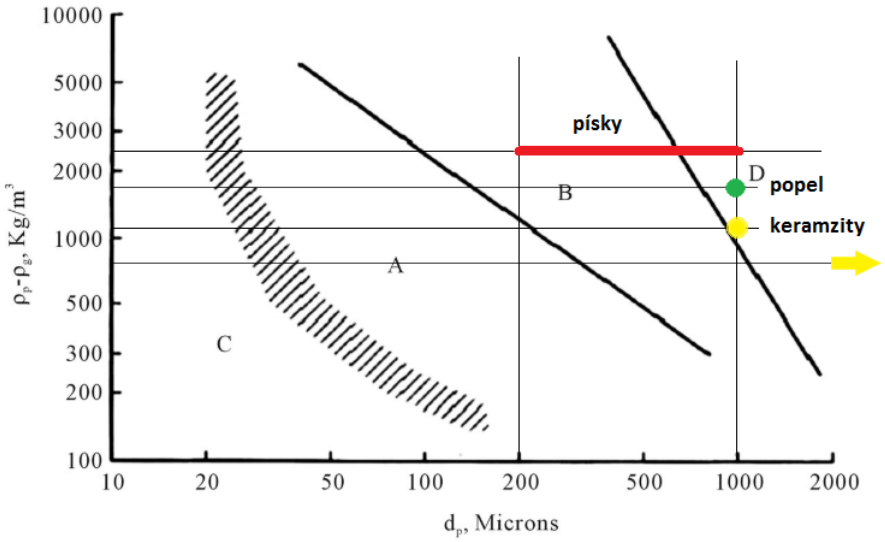
V tabulce (4.4) jsou uvedeny výsledky pro měřené materiály. Odlišnosti ve výsledcích prahové rychlosti a tlakové ztráty fluidní vrstvy mohou být způsobeny tím, že hodnoty hustot (s tím spojena mezerovitost) a sféricit jsou vzaty z literatury a nemůžeme říci, že jsou zcela identické pro dané materiály.

| měření při 3,1 kg | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | písky | | | | keramzity | | popel (vysoký obsah železa) |
| materiál v rozmezí (mm) | 0,1-0,6 | 0,3-0,8 | 0,3-3,0 | 0,5-1,0 | 0-2 | 2-4 | - |
| hustota (kg/m3) | 2500 | 2500 | 2500 | 2500 | 1050 | 850 | 1800 |
| sypná hmotnost (kg/m3) | 1413,11 | 1413,11 | 1413,11 | 1350,76 | 575 | 450 | 918,5158 |
| mezerovitost (-) | 0,435 | 0,435 | 0,435 | 0,460 | 0,452 | 0,471 | 0,490 |
| sféricita (-) | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,95 | 0,95 | 0,8 |
| střední průměr (mm) | 0,41 | 0,52 | 0,8 | 0,77 | 1,034 | 2,648 | 0,55 |
| prahová rychlost fluidace (m/s) | 0,14 | 0,23 | 0,329 | 0,324 | 0,29 | 0,613 | 0,483 |
| teoretická prahová rychlost fluidace (m/s) | 0,134 | 0,204 | 0,398 | 0,442 | 0,397 | 0,885 | 0,213 |
| tlaková ztráta fluidní vrstvy (Pa) | 689 | 727 | 727 | 710 | 770 | 815 | 812 |
| teoretická tlaková ztráta fluidní vrstvy (Pa) | 900 | 900 | 900 | 900 | 845 | 811 | 900 |

| měření při 2,7 l | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | písky | | | keramzity |
| materiál v rozmezí (mm) | 0,1-0,6 | 0,3-3,0 | 0,5-1,0 | 0-2 |
| hustota (kg/m3) | 2500 | 2500 | 2500 | 1050 |
| sypná hmotnost (kg/m3) | 1413,11 | 1413,11 | 1350,76 | 575 |
| mezerovitost (-) | 0,435 | 0,435 | 0,460 | 0,452 |
| sféricita (-) | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,95 |
| střední průměr (mm) | 0,41 | 0,8 | 0,77 | 1,034 |
| prahová rychlost fluidace (m/s) | 0,147 | 0,282 | 0,299 | 0,303 |
| teoretická prahová rychlost fluidace (m/s) | 0,134 | 0,398 | 0,442 | 0,397 |
| tlaková ztráta fluidní vrstvy (Pa) | 994 | 1070 | 950 | 770 |
| teoretická tlaková ztráta fluidní vrstvy | 1108 | 1108 | 1060 | 845 |

*Tabulka 4.4 Tabulky výsledků pro měření*

## 4.5 Měřené materiály v diagramu Geldartových skupin




*Obrázek 4.11 Měřené materiály v diagramu Geldartových skupin, písky červeně, popel zeleně, keramzity žlutě [25]*

Z obr. (4.11) můžeme vidět, že měřené křemenné písky se pohybují převážně ve skupině B, což je skupina písků a většiny částic o velikosti $40\,\mu m < \overline{d_p} < 500\,\mu m$ a hustotě $1{,}4 < \rho_{solid} < 4\ g/cm^3$. Tyto pevné látky dobře fluidují s prudkým probubláváním s velkými bublinami. Keramzity můžeme zařadit do skupiny D, což je skupina velkých částic s vysokou hustotou. Hluboké vrstvy těchto pevných látek je obtížné fluidovat. Chovají se nepravidelně a tvoří se zde velké explodující bubliny. Zrna, hrášek, kávová zrna, uhlí a kovy proto obvykle fluidují v nízkých vrstvách nebo v průtokovém režimu. [1]

# 5 Volba správného typu fluidní sušky pro daný materiál

Z důvodu využití energie ze spalování biomasy jsem pro zhodnocení vybral dřevní štěpku a dřevní piliny. Z důvodu nutnosti sušení obilnin jsem uvedl pouze pár zástupců a to: ječmen, oves a hrách.

*Obrázek 5.1 Dřevní štěpka*

*Obrázek 5.2 Piliny*

*Obrázek 5.3 oves*

*Obrázek 5.4 ječmen*

*Obrázek 5.5 Hrách*

## 5.1 Popis jednotlivých materiálů

### 5.1.1 Dřevní štěpka

Dřevní, resp. lesní štěpka je strojně nakrájená a nadrcená dřevní hmota na částice o délce od 3 do 250 mm. Je získávána z odpadů lesní těžby a průmyslového zpracování dřeva nebo rychle rostoucích dřevin. Jedná se o velmi levné biopalivo určené pro vytápění větších budov. Podle kvality štěpky a dalších příměsí ji můžeme dělit na štěpku zelenou, hnědou a bílou. [21]

Dřevní štěpka ze zbytků lesní těžby jsou strojně zpracované těžební zbytky a kmínky z probírek na délku 50 až 250 mm. Obsah vody bezprostředně po těžbě dosahuje více než 55 %, objemová hmotnost se pohybuje okolo 300 kg/m$^3$. Obsah vody po přirozeném dosoušení přes léto na slunném a větru vystaveném místě zpravidla klesá na 30 % při objemové hmotnosti kolem 250 kg/m3. Výhřevnost je vysoce závislá na obsahu vody, její hodnotu můžeme uvažovat v rozmezí 8 až 12 MJ/kg. [21]

Na trhu se objevuje několik druhů dřevní štěpky, především:

Zelená štěpka (lesní)- Štěpka získaná ze zbytků po lesní těžbě. Lze v ní nalézt nejen části drobných větví, ale také listí, případně jehličí – proto zelená štěpka. Tím, že se zpracovává čerstvá hmota, je vlhkost této štěpky vysoká. [21]

Hnědá štěpka-Štěpka získaná ze zbytkových částí kmenů, pilařských odřezků apod. Sjednocujícím prvkem je obsah kůry. Dříví totiž nebylo před zpracováním odkorněno, lze tedy na jednotlivých štěpkách rozpoznat části kůry. [21]

Bílá štěpka-Štěpka získaná z odkorněného dříví, obvykle odřezků při pilařské výrobě. Ani na jednotlivých štěpkách se již nenachází kůra (narozdíl od štěpky hnědé). Využívá se především pro výrobu dřevotřískových desek. [21]

Dřevní štěpka ze zbytků z průmyslového zpracování dřeva je strojně zpracovaný odpad průmyslového zpracování dřeva na délku 3 až 15 cm. Obsah vody z pilařských odpadů bývá kolem 45 %, z truhlářské výroby kolem 15 %. Výhřevnost 9 až 16 MJ/kg. [21]

Štěpku lze používat ve vyšší výkonové škále kotlů a kamen v rodinných domech a ve větších budovách. Vzhledem k povaze paliva jde o zcela čistý a obnovitelný zdroj energie bez přidané energie (např. na sušení nebo lisování), což se projevuje v nízké pořizovací ceně za palivo. [21]

V kotlích na spalování dřevní štěpky je možno spalovat nestlačenou, volně loženou dřevní štěpku zpracovanou nadrobno (štěpkovačem nebo drtičem) z dřevních zbytků z lesní těžby, pil apod. Podle velikosti a výkonu kotle a doporučení výrobce lze využívat štěpku hrubší o nestejné frakci vyrobenou v kladivových drtičích nebo jemnější štěpku vyrobenou v nožových štěpkovačích. [21]

*Obrázek 5.6 Dřevní štěpka vyrobená nožovým štěpkovačem [21]*

*Obrázek 5.7 Dřevní štěpka vyrobená kladivovým drtičem [21]*

Z důvodu velkého vlivu vlhkosti paliva na výhřevnost můžeme takto zpracované palivo sušit ve fluidní sušárně. Protože však nelze zcela zaručit přesné rozměry takto nakrájené či nadrcené kousky a s ohledem na velikost částice o několika mm, bude nejlepší tento materiál sušit ve vibrofluidní sušce (obr.3.20).

Sušení se doporučuje i pro materiál pro uskladnění. Pro skladování dřevní štěpky potřebujeme díky její nízké objemové hmotnosti prostornější sklady, velkoobjemová sila, nebo haly. V případě instalace kotle na štěpku v rodinném domě je potřeba počítat s odpovídajícími prostorami např. ve sklepě pro min. 50 m3 štěpky. Ve skladu musí být především zaručeno nezbytné provětrávání.

Palivová štěpka má vyšší obsah vody, je náchylná k plesnivění a zapařování, což by mohlo v uzavřených místnostech vést k riziku samovznícení. Dostatečné provětrávání skladu nám zajistí i dosoušení štěpky během skladování. Uskladnění přímo ve vytápěných obytných budovách bez účinného provětrávání skladu se nedoporučuje, v některých zemích je přímo zakázáno. Při skladování většího objemu dřevní štěpky je potřeba dimenzovat vstup do skladu pro dopravní a manipulační techniku. [21]

Dřevní štěpka zatím není klasickým palivem s rozvinutou sítí dodavatelů pro malospotřebitele. [21]

Základní technické parametry štěpky jsou:

výhřevnost: 8 až 15 MJ/kg

váha/objem: kolem 250 kg/m3

vlhkost: 15 až 50 %. [21]

### 5.1.2 Dřevní piliny

Dřevní hmota je jako palivo obecně velice složitě definovatelné. Má různou formu, vlhkost, výhřevnost, popelnatost a s tím jsou spojeny i různé nároky na distribuci, skladování a konstrukci samotného spalovacího zdroje. To platí především pro dřevní odpad ve formě pilin, které jsou svým charakterem absolutně nevhodnými palivy například pro individuální vytápění rodinných domů. Pokud však tuto hmotu na protlačovacím matricovém lisu „zkoncentrujeme“ do pelety, získáme naopak velice přesně definovatelné palivo, které umožňuje přenést právě do malých objektů vysoký standard vytápění pevnou biomasou. [17]

Peleta je palivo ryze rostlinného původu s řadou příznivých vlastností a parametrů. Jde o granule s průměrem od 6 do 20 mm, které se vyrábí zhruba do délky 40 mm. Podoba granulí je dosažena vysokotlakým lisováním dřevního odpadu (především pilin) za teploty, při které lignin plastifikuje a přejímá funkci pojiva udržující pelety v příslušném tvaru. Kromě toho lignin chrání pelety proti příjímání vlhkosti při jejich uskladnění. Pelety se vyrábí ve specializovaných výrobnách, které jsou označovány jako peletárny. Někdy se k jejich výrobě také používá sláma, řepková sláma či průmyslový šťovík. Mezi základní parametry tohoto fytopaliva patří především jeho nízký obsah popela (do 1 %) a nízký obsah vody (do cca 10 %). Výhřevnost pelet se pohybuje okolo 18 MJ/kg a jejich pevnost významně ovlivňuje obsah dřevního prachu. Povaha pelet snižuje nároky na skladovací prostory za podmínek udržení suchého prostředí. [18]

Vstupní surovinu pro výrobu pelet tvoří odpady vznikající při prvotním pilařském zpracování nebo při těžbě dřeva. Nejvhodnější jsou piliny a suchý odpad dřevoprůmyslu, který by měl mít minimální obsah dřevního prachu. Vlhkost pilin by neměla přesahovat hranici 10 %, vyšší vlhkost suroviny se odstraňuje umělým sušením. Surovina se upraví na vhodnou velikost kladívkovým drtičem, který se zařazuje před vlastní peletizaci. Hlavní stroj pro výrobu pelet je protlačovací matricový lis (talířový, prstencový nebo plochý). Protlačováním materiálu otvory matrice o potřebném průměru vznikají pelety o vysoké teplotě a křehkosti. Následuje ochlazení, pelety dosáhnou potřebné pevnosti a trvanlivosti expedují se na váhy nebo rovnou do zásobníku (skladu). [18]

*Obrázek 5.8 Výroba pelet [17]*

Protože lignin chrání pelety proti přijímání vlhkosti, není potřeba pelety nijak sušit při správném uskladnění. Proces sušení se zavádí před lisování a stejně jako v kapitole (5.1.1) sušíme dřevní štěpku ve vibrofluidní sušárně upravenou kladivovým drtičem či nožovým štěpkovačem.

Hlavním problémem pilin je vlhkost, která se běžně pohybuje mezi 50 až 60 %. Bez rychlého vysušení pilina začíná prakticky ihned plesnivět a celkově degradovat. Díky činnosti hub, bakterií a parenchymatických buněk nelze vlhkou pilinu skladovat jako palivo déle než 3 měsíce. Vedle ztráty výhřevnosti a celkového objemu hrozí mimo jiné samovznícení a v neposlední řadě také velké zdravotní riziko pro obsluhu (napadení dýchacích cest spory plísní a hub). [17]

Proto je nutné tento typ paliva sušit. Vysoká vlhkost a malé rozměry způsobují lepivost materiálu a tedy tvorbu větších hrudek. Aby bylo možné takovýto materiál fluidovat, je nutné tyto hrudky rozmělnit na menší částice. To můžeme zavedením rozmetadla nad fluidní vrstvu, či vybavit zařízení míchadlem, nebo zkombinovat obojí. Proto by bylo vhodné sušit tento materiál ve fluidní sušce vybavenou rozmetadlem nebo ve fluidní sušce s promíchávanou vrstvou. Sušící komora musí být dostatečně vysoká, neboť při fluidaci rozmělňujících větších hrudek musí mít sušící vzduch vysokou rychlost. To může zapříčinit úlet částic, proto můžeme uvažovat i o dvoustupňové sušce, přičemž ve druhém stupni bychom sušili malé částice z úletu prvního stupně s menší rychlostí sušícího vzduchu.

### 5.1.3 Obilniny

Posklizňová úprava představuje konkrétní úpravu zrnin a olejnin určených pro přímý prodej nebo dlouhodobé skladování. Účelem této správné praxe je poskytnout skladovateli podklady a pravidla pro zpracování vlastních postupů. Pravidla pro všechny skladovatele a prvovýrobce s vlastními sklady respektují náležitosti Kodexu Alimentarius, ČSN EN ISO 22 000, GMP (Good Manifacturing Practice) a GTP (Good Trading Practice), které dodržují zásady HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Points). [30]

Sklizené zrniny a olejniny po sklizni procházejí procesem posklizňové úpravy, který na základě zjištěné vlhkosti, obsahu příměsí a nečistot, zahrnuje:

předčištění, sušení, čištění, aktivní větrání, chemickou konzervaci, protiplísňové ošetření. [30]

Cílem posklizňové úpravy je konečná, skladovací vlhkost do 14 % u zrnin, do 8 % u olejnin a zbavení zrna organických a minerálních nečistot. [30]

Převážná část prvovýrobců v ČR je vybavena posklizňovými linkami s předčisticími a čisticími kapacitami a asi polovina je vybavena sušicími kapacitami. Silové sklady mají kompletní čisticí i sušicí kapacitu. [30]

Vlhkost je jedním z nejdůležitějších ukazatelů jakosti, protože na ní závisí intenzita biologických procesů, které v rostlinných produktech probíhají. [30]

Voda může být v produktu volná nebo vázaná. Vázaná voda je ta, která se fyzikálně-chemicky nebo chemicky váže se základními látkami produktu, u zrna obilí to je 14 až 15 %, u řepky olejné 8 %. Při vyšší vlhkosti se objevuje voda volná, která urychluje všechny biologické procesy. [30]

Sušení je proces vedoucí ke snížení vlhkosti (volné vody) sklizených a skladovaných produktů na úroveň hodnot potřebných ke dlouhodobému skladování. [30]

Režim sušení závisí:

a) na druhu a jeho vlastnostech,

b) na účelu sušeného materiálu,

c) na vstupní vlhkosti. [30]

Přestože u velkokapacitních sušáren je proces sušení v podstatě zautomatizován, je třeba dodržovat stanovené technologické postupy pro jednotlivé druhy, bezpečnostní a protipožární opatření stanovená technickými podmínkami a provozními řády. [30]

Bezpečné skladování zrnin vyžaduje snížit vlhkost zrna do 14 %. Při jednom odsušení snížíme vlhkost o 3 až 4 %. Proto je důležité třídit zrno před sušením do skupin, a to s vlhkostí do 18 % a nad 18 % s tím, že není ekonomické sklízet zrniny s výjimkou kukuřice s vlhkostí nad 20 %. V současné době se využívají v naprosté většině sušárny sesypné a teplovzdušné s nepřímým ohřevem vzduchu. [30]

Při vyšší vstupní vlhkosti se využívají vyšší teploty sušicího vzduchu. Zvláštní pozornost vyžaduje sušení potravinářské pšenice a sladovnického ječmene, kdy je nutno dodržet snížený náhřev zrna, aby nešlo ke zhoršení jakosti a snížení klíčivosti zrna. [30]

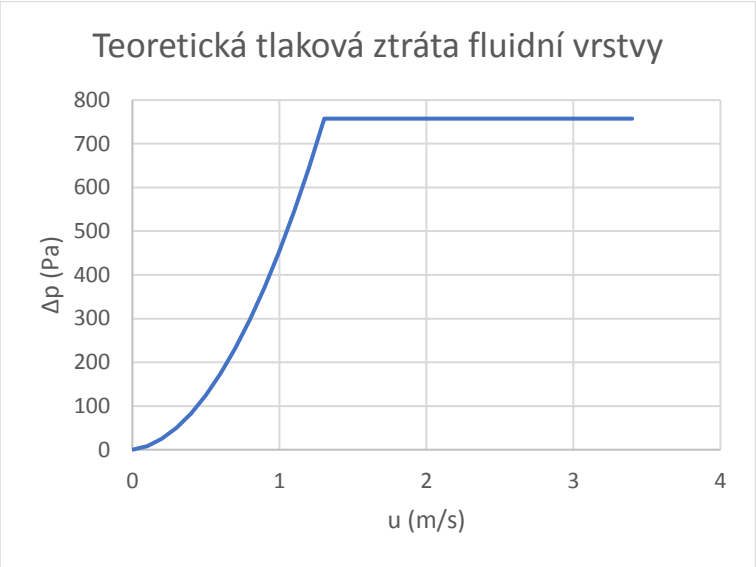
Výstupní teplota sušeného zrna musí být o 5 °C nižší při výstupu ze sušárny než teplota venkovního vzduchu. [30]

Ve smyslu HACCP a GMP (GTP) je teplota sušení důležitým kritickým bodem pro kvalitu zrna. [30]

Pro velké rozměry obilovin cca 5 až 10 mm se obilniny obecně nehodí pro fluidaci, stejně jako dřevní štěpka, ale na rozdíl od ní se obilí vyznačuje malými rozsahy rozměrů částic, proto je vhodné použít sušku s fontánovou fluidní vrstvou, která by byla ekonomičtější a jednodušší než suška s vibrujícím roštem.

## 5.2 Výpočet pro vybrané materiály biomasy

Výsledky vypočítaných charakteristik jsou v příloze (8.3) Teoretické vyhodnocení tlakové ztráty fluidní vrstvy pro vybrané materiály biomasy. Na obr. (5.9) je uvedena charakteristika tlakové ztráty fluidní vrstvy pro 3,1 kg dřevní štěpky.




*Obrázek 5.9 Teoretický výpočet pro 3,1 kg dřevní štěpky*

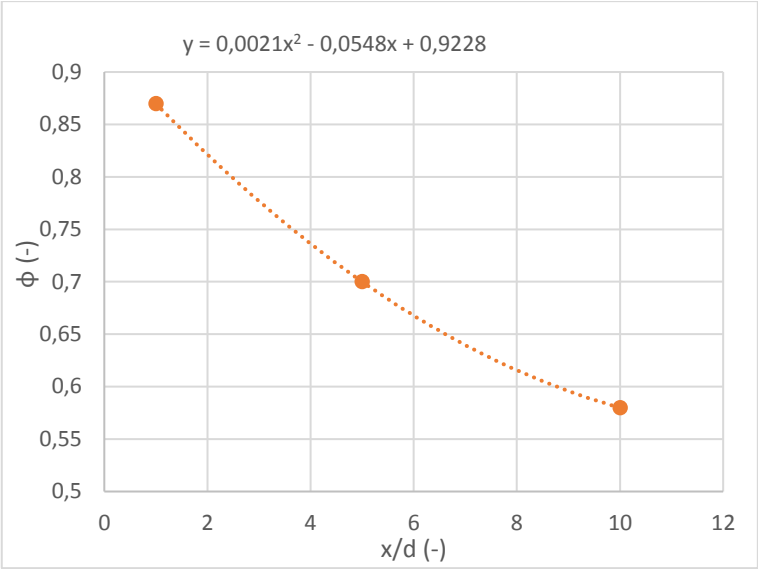
Hodnoty v tabulce (5.1) pro dřevní štěpku vzaty z [8]. Hodnoty pro dřevní piliny vzaty z [9]. Hodnoty pro oves, ječmen a hrách byly určeny malým domácím experimentem. Sypná hmotnost určena jako

$$\rho_{sypná} = \frac{m}{V}, \tag{5.1}$$

přičemž jsem do malé odměřovací nádobky, která byla položena na váze, nasypal materiál určitého objemu a odečetl hmotnost. Hustoty jsem určil jako

$$\rho_{solid} = \frac{m}{\Delta V}, \tag{5.2}$$

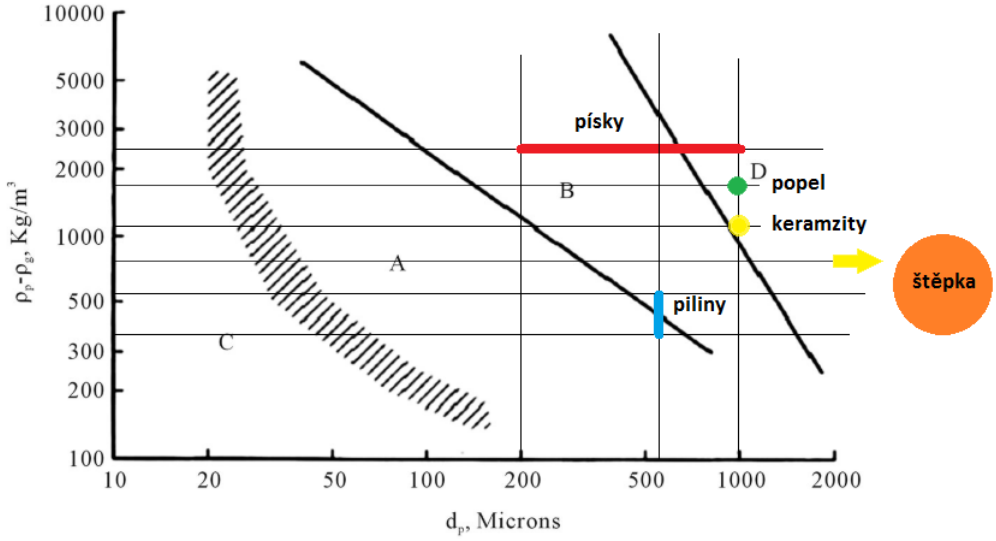
přičemž jsem do malé odměřovací nádobky s vodou, která byla položena na váze, sypal materiál a navýšil objem v nádobce o určitou hodnotu a odečetl nasypanou hmotnost. Mezerovitost se spočítala z rovnice (4.7). Sféricita se určila z naměřených hodnot a literatury [1]. Jednotlivá zrna jsem měřil posuvným měřítkem, hodnoty délek i šířek se zprůměrovaly. Zrna jsem přirovnal k válci a z dat v [1] jsem vynesl závislost sféricity na poměru x/d.




*Obrázek 5.10 Závislost sféricity na poměru výšky a průměru zrn*

Vzhledem k tomu, že můžeme uvážit zrna hrachu jako téměř dokonalé koule, vyhodnocovali se závislosti tlakové ztráty fluidní vrstvy i pro zrna se sféricitou rovno 1, potom se prahové rychlosti zvýšili asi o 0,1 m/s. Střední průměr zrn se určil jako

$$d_p = \frac{\bar{x} + \bar{d}}{2}. \tag{5.3}$$




*Obrázek 5.11 Vyznačení materiálů do diagramu Geldartových skupin, piliny modře, štěpka oranžově [25]*

Z obr. (5.11) můžeme vidět, že piliny se pohybují převážně na rozhraní skupin A a B, přičemž skupina A je skupina materiálů aeretabilních, čili materiály mající malou střední velikost částic nebo nízkou hustotu částic (do 1,4 g/cm$^3$). Tyto pevné látky snadno fluidují s plynulou fluidací při nízkých rychlostech plynu a řízeným probubláváním malých bublin při vyšších rychlostech plynu. Na druhé straně dřevní štěpka patří do oblasti materiálů, které velmi špatně fluidují a to z důvodu velkých rozměrů částic. [1]

V tabulce (5.1) jsou uvedeny teoretrické výsledky prahové rychlosti fluidace a tlakové ztráty fluidní vrstvy pro vybrané materiály biomasy.

| vyhodnocení pro 3,1 kg | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| materiál | štěpka | piliny | | | | | | oves | ječmen | hrách |
| vlhkost (%) | - | 82 | 54 | 45 | 33 | 26 | 8 | - | - | - |
| hustota (kg/m3) | 423 | 510 | 469 | 453 | 433 | 419 | 364 | 850 | 1150 | 1290 |
| sypná hmotnost (kg/m3) | 215,73 | 213 | 195 | 175 | 171 | 171 | 170 | 510 | 712,5 | 824 |
| mezerovitost (-) | 0,49 | 0,582 | 0,584 | 0,614 | 0,605 | 0,592 | 0,533 | 0,4 | 0,380 | 0,361 |
| sféricita (-) | 0,75 | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 0,715 | 0,799 | 0,868 |
| střední průměr (mm) | 6,87 | 0,625 | 0,625 | 0,625 | 0,625 | 0,625 | 0,625 | 7,55 | 6,3 | 7,15 |
| teoretická prahová rychlost fluidace (m/s) | 1,305 | 0,064 | 0,060 | 0,071 | 0,064 | 0,057 | 0,032 | 1,091 | 1,132 | 1,250 |
| teoretická tlaková ztráta fluidní vrstvy (Pa) | 758 | 899 | 899 | 899 | 899 | 898 | 898 | 900 | 900 | 900 |

| vyhodnocení pro 2,7 l | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| materiál | štěpka | piliny | | | | | | oves | ječmen | hrách |
| vlhkost (%) | - | 82 | 54 | 45 | 33 | 26 | 8 | - | - | - |
| hustota (kg/m3) | 423 | 510 | 469 | 453 | 433 | 419 | 364 | 850 | 1150 | 1290 |
| sypná hmotnost (kg/m3) | 215,73 | 213 | 195 | 175 | 171 | 171 | 170 | 510 | 712,5 | 824 |
| mezerovitost (-) | 0,49 | 0,582 | 0,584 | 0,614 | 0,605 | 0,592 | 0,533 | 0,4 | 0,380 | 0,361 |
| sféricita (-) | 0,75 | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 0,715 | 0,799 | 0,868 |
| střední průměr (mm) | 6,87 | 0,625 | 0,625 | 0,625 | 0,625 | 0,625 | 0,625 | 7,55 | 6,3 | 7,15 |
| teoretická prahová rychlost fluidace (m/s) | 1,305 | 0,064 | 0,060 | 0,071 | 0,064 | 0,057 | 0,032 | 1,091 | 1,132 | 1,250 |
| teoretická tlaková ztráta fluidní vrstvy (Pa) | 142 | 167 | 153 | 137 | 134 | 134 | 133 | 400 | 559 | 646 |

*Tabulka 5.1 Tabulky s daty a výsledky pro výpočty pro vybrané druhy biomasy*

## 5.3 Zhodnocení vhodnosti typu fluidní sušky pro daný materiál

| | dřevní štěpka | piliny | obilniny |
|---|---|---|---|
| kontinuální fluidní suška s protiproudým uspořádáním | nevhodné pro velkou velikost a široké rozmezí velikosti částic | nevhodné pro široké rozmezí doby zdržení | nevhodné pro velkou velikost částic |
| kontinuální fluidní suška s průtočným režimem | nevhodné pro velkou velikost a široké rozmezí velikosti částic | vhodné pro sušení nebo předsušení při nízkých vlhkostech materiálu | nevhodné pro velkou velikost částic |
| fluidní suška s rozmetadlem | nevhodné pro velkou velikost a široké rozmezí velikosti částic | vhodné pro tento materiál | nevhodné pro velkou velikost částic |
| průtoková spirálová fluidní suška | nevhodné pro velkou velikost a široké rozmezí velikosti částic | vhodné pro sušení při nízkých vlhkostech materiálu | nevhodné pro velkou velikost částic |
| dvoufázová fluidní suška | nevhodné pro velkou velikost a široké rozmezí velikosti částic | vhodné pro daný materiál | nevhodné pro velkou velikost částic |
| vibrofluidní suška | vhodné pro daný materiál | vhodné pro daný materiál | vhodné pro daný materiál |
| bezroštová fluidní suška | nevhodné pro široké rozmezí velikosti částic | nevhodné pro vysoké rychlosti sušícího vzduchu | vhodné pro malé rozmezí velikosti částic |
| fluidní suška s míchanou fluidní vrstvou | nevhodné pro velkou velikost a široké rozmezí velikosti částic | vhodné pro předoušení s vyšší rychlostí sušícího vzduchu | nevhodné pro možné porušení materiálu |

*Tabulka 5.2 Tabulka vhodnosti použití různých typů fluidních sušek*

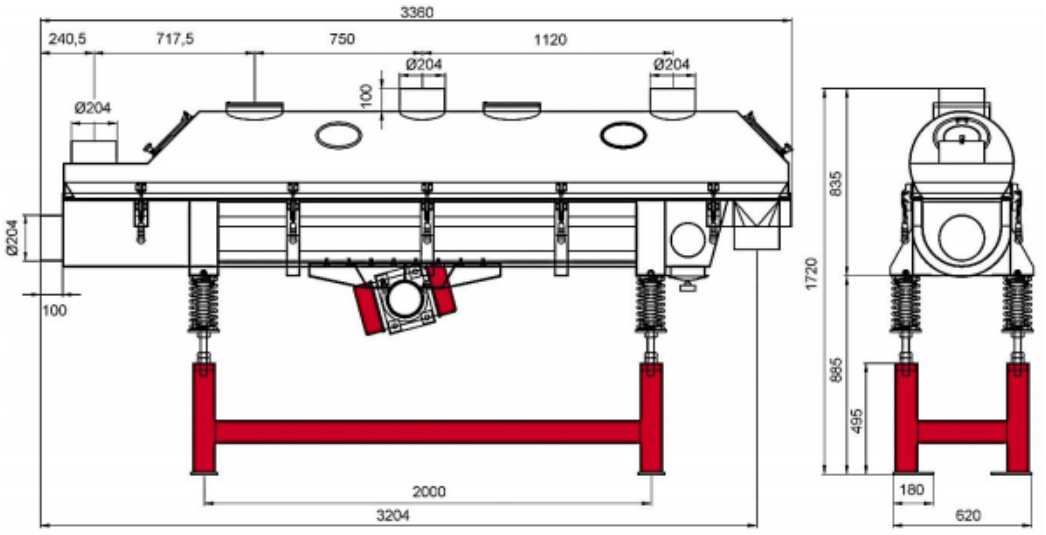
Z tabulky (5.2) můžeme vyčíst a porovnat nejvhodnější typ fluidní sušky pro dané materiály. Pro dřevní štěpku se jeví vhodný typ fluidní sušky pouze vibrofluidní suška z důvodu širokého rozmezí velikosti částic. Pro dřevní piliny jsou vhodné hned několik fluidních sušek. Piliny jsou dobře fluidovatelné i při nízkých rychlostech sušícího plynu, proto největší vliv při vybírání vhodného typu fluidní sušky bude mít vlhkost materiálu. Jako nejvhodnější pro sušení pilin se jeví vibrofluidní suška, dvoufázová fluidní suška a dvoustupňová fluidní suška s prvním stupněm fluidní vrstvy s promícháváním a druhým stupněm průtokového spirálového provedení. Z ekonomických důvodů je ale nejvhodnější dvoufázová fluidní suška, která je kompaktnější než dvoustupňová suška a méně náročná na technologii než vibrofluidní suška. Pro obilniny jsou vhodné sušky vibrofluidní a bezroštové fluidní sušky. Z hlediska menší náročnosti na konstrukci je vhodnější pro tyto materiály zvolit bezroštovou sušku s fontánovou fluidní vrstvou. Musíme ale konstatovat, že nejflexibilnější suška pro sušení biomasy je vibrofluidní suška, která se vypořádá se širokou škálou materiálů a pokud je potřeba sušit v podniku vícero materiálů, je tedy jasnou volbou zvolit vibrofluidní sušku pro sušení biomasy.

## 5.4 Koncepční návrh vibrofluidní sušky pro biomasu

Vibrofluidní suška je tvořena těmito základními prvky. Stojan nese na pružinách vibrofluidní komoru, na které jsou upevněny vibromotory. Dolní část komory s horní částí rozděluje distributor vzduchu a horní část je přišroubována k dolní části.

Sušící médium je dopravováno ventilátorem skrz výměník tepla pod rošt, skrze fluidní vrstvu, odvětrávacím potrubím a nakonec skrze odlučovače prachu. Materiál je veden nad rošt do sušící komory od vpádu k výpadu.

*Obrázek 5.12 Vibrofluidní suška [35]*




*Obrázek 5.13 Příklad konstrukce vibrofluidní sušky [35]*

Pro sušení dřevní štěpky ve vibrofluidní sušce na obr. (5.13) s rozměry fluidní plochy 340 x 3000 mm je povrch fluidní plochy 1,02 $m^2$. Při výšce vrstvy materiálu za klidu 0,2 m by bylo v sušce sušeno 0,204 $m^3$ materiálu, který by byl sušen ohřátým vzduchem o teplotě kolem 200 °C řádově desítky minut. Rychlost sušícího vzduchu pro takovou vrstvu bez využití vibrací by byla kolem 1,5 m/s a tlaková ztráta kolem 350 Pa. Se zvyšováním frekvence vibrací se rychlost sušícího vzduchu výrazně snižuje. Pokud bychom sušili s intenzitou sušení 150 kg/$m^3$h materiál s měrnou vlhkostí 60 % na 20

%, sušící proces by trval 0,575 h, tedy 34,5 min. Hodnoty pro výpočet doby sušení jsou uvedeny v tabulce (5.3).

| | | |
|---|---|---|
| plocha fluidní komory | 1,02 | $m^2$ |
| výška fluidní vrstvy za klidu | 0,2 | m |
| objem materiálu | 0,204 | $m^3$ |
| intenzita sušení | 150 | $kg/m^3h$ |
| počáteční vlhkost | 0,6 | - |
| konečná vlhkost | 0,2 | - |
| hmotnost sušiny | 44 | kg |
| hmotnost mokrého materiálu | 70,4 | kg |
| hmotnost odpařené vody | 17,6 | kg |
| doba sušení | 0,575 | h |
| doba sušení | 34,5 | min |

*Tabulka 5.3 Tabulka s hodnotami pro výpočet doby sušení*

V tabulce (5.4) jsou uvedeny hodnoty intenzity sušení vztažené na kg, $m^2$ a $m^3$.

| | | |
|---|---|---|
| intenzita sušení | 30,6 | kg/h |
| intenzita sušení | 30 | $kg/m^2h$ |
| intenzita sušení | 150 | $kg/m^3h$ |

*Tabulka 5.4 Hodnoty měrné intenzity sušení*

# 6 Závěr

V této práci jsem se zabýval procesem fluidního sušení biomasy. Popsal jsem různé typy sušáren a popsal jsem obecně proces sušení. Dále jsem se zabýval fluidací. Uvedl jsem proces fluidace a základní pojmy k této problematice. Popsal jsem různé vlivy působící na fluidní vrstvu a proces sušení ve fluidní vrstvě. Vyjmenoval a popsal jsem části fluidní sušky a uvedl různé typy fluidních sušek. Poté jsem popsal základní vztahy pro výpočty pro návrh fluidní sušárny. V experimentální části jsem se zabýval vyhodnocováním fluidních charakteristik pro různé materiály. Teoreticky jsem vypočítal hodnoty pro fluidní charakteristiky měřených materiálů a vybraných materiálů biomasy. Prahová rychlost fluidace pro se pohybovala od 0,06 až 1,3 m/s. Nejnižší prahová rychlost fluidace byla vypočítána pro dřevní piliny. Nejvyšší hodnota prahové rychlosti fluidace byla vypočítána pro dřevní štěpku. Tlaková ztráta fluidní vrstvy pro 3,1 kg materiálu se pohybovala od 689 Pa pro zkoušený nejjemnější písek až 900 Pa pro teoretické vyhodnocení většiny materiálů. Tlaková ztráta fluidní vrstvy pro 2,7 l materiálu se pohybovala od 134 Pa vypočtených pro dřevní piliny až 1108 Pa vypočtených pro písek. Jednotlivé materiály biomasy jsem popsal a zdůvodnil jsem pro ně nutnost sušení. Jednotlivé materiály s ohledem na schopnost materiálu fluidovat jsem porovnal v diagramu Geldartových skupin. Materiály biomasy jsou obecně kvůli velké velikosti částic nevhodné pro fluidaci. S ohledem na tuto vlastnost jsem vybral vhodný typ fluidní sušky. Rozhodl jsem se pro vibrofluidní sušku, protože v ní můžeme účinně sušit dřevní štěpku, ale je vhodná i pro jiné materiály a to v široké škále. Na závěr jsem uvedl koncepční návrh vibrofluidní sušky.

# 7 Použitá literatura

[1] KUNII, Daizo a Octave LEVENSPIEL. *Fluidization engineering*. Second edition. Boston: Butterworth-Heinemann, 1991. ISBN 0-409-90233-0.

[2] MUJUMBAR, Arun S. *Handbook of industrial drying*. Second edition. New York: Marcel Dekker, 1995. ISBN 0-8247-8996-2.

[3] SARAVACOS ,G. a A. E.KOSTAROPOULOS Food Dehydration Equipment. In: *Handbook of Food Processing Equipment*. Cham: Springer2016. ISBN 978-3-319-25018-2. Food Engineering Series.

[4] ŠESTÁK, Jiří a Rudolf ŽITNÝ. *Tepelné pochody II: výměníky tepla, odpařování, sušení, průmyslové pece a elektrický ohřev*. Vyd. 2. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-01-03475-5.

[5] VANĚČEK, Vojtěch, Radek DRBOHLAV a Miroslav MARKVART. *Fluidní sušení*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963. Metody a pochody chemické technologie.

[6] FÁBERA, Jaroslav. *Přenosové jevy při sušení plošných textilních materiálů*. Liberec, 2013. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra energetických zařízení. Vedoucí práce Prof. Ing. Karel Adámek, CSc.

[7] STRAKA, Lukáš. *Sušení biomasy*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

[8] AGU, Cornelius Emeka, Lars-Andre TOKHEIM, Christoph PFEIFER a Britt M.E. MOLDESTAD. Behaviour of biomass particles in a bubbling fluidized bed: A comparison between wood pellets and wood chips. *Chemical Engineering Journal* [online]. 2019, **363**, 84-98 [cit. 2020-06-17]. DOI: 10.1016/j.cej.2019.01.120. ISSN 13858947. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1385894719301421

[9] CLARKE, K.L., T. PUGSLEY a G.A. HILL. Fluidization of moist sawdust in binary particle systems in a gas–solid fluidized bed. *Chemical Engineering Science* [online]. 2005, **60**(24), 6909-6918 [cit. 2020-06-17]. DOI: 10.1016/j.ces.2005.06.004. ISSN 00092509. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0009250905005270

[10] HU, Xue, Jiby KURIAN, Yvan GARIEPY a Vijaya RAGHAVAN. Optimization of microwave-assisted fluidized-bed drying of carrot slices. *Drying Technology* [online]. 2016, **35**(10), 1234-1248 [cit. 2020-06-17]. DOI: 10.1080/07373937.2016.1242014. ISSN 0737-3937. Dostupné z: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07373937.2016.1242014

[11] JANEVSKI, Jelena, Mladen STOJILJKOVIC, Branislav STOJANOVIC a Mica VUKIC. Experimental research of the influence of particle size and fluidization velocity on zeolite drying in a two-component fluidized bed. *Thermal Science* [online]. 2016, **20**(suppl. 1), 103-111 [cit. 2020-06-17]. DOI: 10.2298/TSCI160128058J. ISSN 0354-9836. Dostupné z: http://www.doiserbia.nb.rs/Article.aspx?ID=0354-98361600058J

[12] KHANALI, Majid, Alireza BANISHARIF a Shahin RAFIEE. Modeling of moisture diffusivity, activation energy and energy consumption in fluidized bed drying of rough rice. *Heat and Mass Transfer* [online]. 2016, **52**(11), 2541-2549 [cit. 2020-06-17]. DOI: 10.1007/s00231-016-1763-z. ISSN 0947-7411. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/s00231-016-1763-z

[13] LV, Weiqiao, Dong LI, Hao LV, Xin JIN, Qinghua HAN, Dianbin SU a Yuchuan WANG. Recent development of microwave fluidization technology for drying of fresh fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology* [online]. 2019, **86**, 59-67 [cit. 2020-06-17]. DOI: 10.1016/j.tifs.2019.02.047. ISSN 09242244. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924224417307641

[14] SIVAKUMAR, R., R. SARAVANAN, A. ELAYA PERUMAL a S. INIYAN. Fluidized bed drying of some agro products – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2016, **61**, 280-301 [cit. 2020-06-17]. DOI: 10.1016/j.rser.2016.04.014. ISSN 13640321. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032116300314

[15] TAECHAPAIROJ, Chaiyong, Somkiat PRACHAYAWARAKORN a Somchart SOPONRONNARIT. Characteristics of Rice Dried in Superheated-Steam Fluidized-Bed. *Drying Technology* [online]. 2004, **22**(4), 719-743 [cit. 2020-06-17]. DOI: 10.1081/DRT-120034259. ISSN 0737-3937. Dostupné z: http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1081/DRT-120034259

[16] ZAREIN, Mohammad, Seyed Hashem SAMADI a Barat GHOBADIAN. Investigation of microwave dryer effect on energy efficiency during drying of apple slices. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* [online]. 2015, **14**(1), 41-47 [cit. 2020-06-17]. DOI: 10.1016/j.jssas.2013.06.002. ISSN 1658077X. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1658077X13000234

[17] LYČKA, Zdeněk. Význam peletizace dřevní hmoty. In: *Biom* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: https://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyznam-peletizace-drevni-hmoty

[18] PEJZL, Jaroslav. Dřevěné (dřevní) pelety. In: *Biom* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: https://biom.cz/cz/odborne-clanky/drevene-drevni-pelety

[19] SCHWARZER, Jan. Teorie vlhkého vzduchu (I). In: *TZB-info* [online]. 29. 5. 2006 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: https://vetrani.tzb-info.cz/teorie-a-vypocty-vetrani-klimatizace/3323-teorie-vlhkeho-vzduchu-i

[20] SKOPEC, Pavel, Jiří ŠTEFANICA a Jan HRDLIČKA. VÝBĚR INERTNÍCH MATERIÁLŮ PRO FLUIDNÍ SPALOVÁNÍ BIOMASY. *Vutbr* [online]. Brno, 2012 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://eu.fme.vutbr.cz/file/Sbornik-EnBio/2012/14_SKOPEC.pdf

[21] STUPAVSKÝ, Vladimír a Tomáš HOLÝ. Dřevní štěpka - zelená, hnědá, bílá. In: *Biom* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: https://biom.cz/cz/odborne-clanky/drevni-stepka-zelena-hneda-bila

[22] ŠIKULA, Ondřej. Programová řešení základních úprav vlhkého vzduchu (I). In: *TZB-info* [online]. 12.12.2005 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: https://www.tzb-info.cz/2926-programova-reseni-zakladnich-uprav-vlhkeho-vzduchu-i

[23] Dielectric Drying. In: *Fennerschool* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: https://fennerschool-associated.anu.edu.au/fpt/drying/dielectric.html

[24] Drying. In: *HOSOKAWA MICRON* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: https://www.hosokawamicron.co.jp/en/machines/187

[25] Experimental Study of Drying Process of COLZA Seeds in Fluidized Bed Dryer by Statistical Methods. In: *Scirp* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: https://www.scirp.org/html/16-3700143_16722.htm

[26] Fluid Bed Dryer: The Ultimate Guide for Importers. In: *SaintyCo* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: https://www.saintyco.com/fluid-bed-dryer-the-ultimate-guide-for-importers/

[27] Granulometrie - sítová analýza materiálu keramzit. In: *Ústav energetiky Fakulty strojní ČVUT* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: http://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/A_granulometrie.pdf

[28] Industrial spray dryers. In: *Industrialspraydryer* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: http://cz.industrialspraydryer8.com/dryer/fluid-bed-dryer.html

[29] IRD Crystallizing and Drying handling system. In: *Sunwell Global* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: https://www.sunwellglobal.com.tw/lang/sp/Ird_crystallizing_drying_handling_system.html

[30] Posklizňová úprava zrnin a olejnin. In: *Zemědělec* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: https://www.zemedelec.cz/poskliznova-uprava-zrnin-a-olejnin/

[31] Rotary dryer. In: *KERONE* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: http://www.kerone.com/rotary-dryer.php

[32] Schematic diagram of the small-scale spray dryer. In: *ReserchGate* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-the-small-scale-spray-dryer_fig2_303917092

[33] Sušení. In: *Vscht* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: https://uchi.vscht.cz/files/uzel/51474/0014~~S87I1MvNzE7UzUstrcrM0StJrSjRyzYy1SsuLU7NywQA.pdf?redirected

[34] Určení prahové rychlosti fluidace. In: *Ústav energetiky Fakulty strojní ČVUT* [online]. [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: http://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/C_fluidace-1.pdf

[35] VIBROFLUIDNÍ SUŠÁRNA PVFS. In: *Torofa* [online]. [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: http://www.torofa.cz/kl_mlyn/vibrofluidni%20susarna%20pvfs%20torofa.pdf

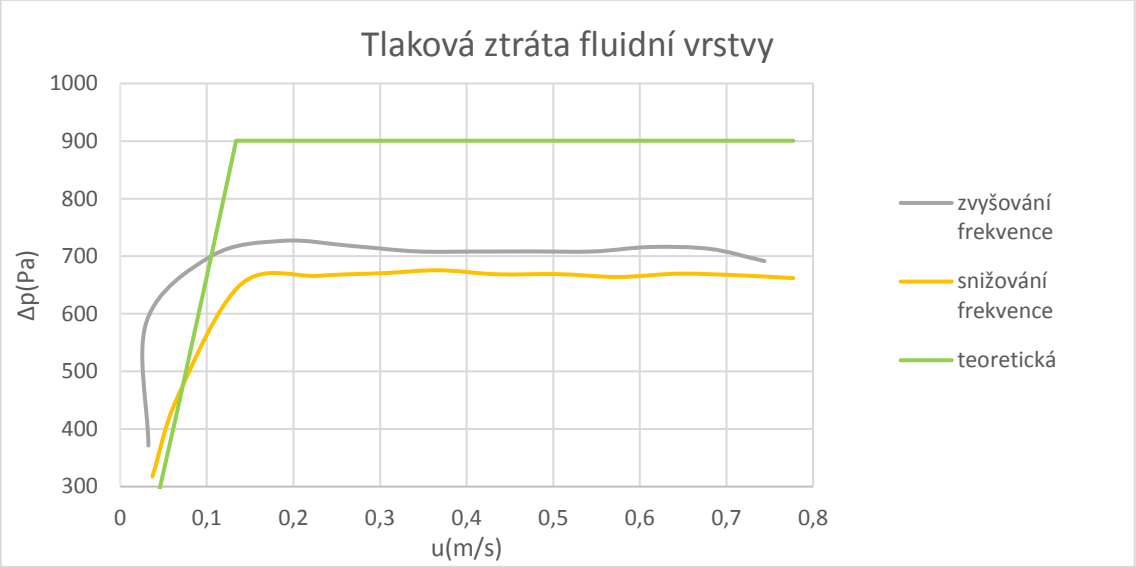
[36] Vzduch. In: *conVERTER* [online]. c2020 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: http://www.converter.cz/tabulky/vzduch.htm

# 8 Přílohy

## 8.1 Vyhodnocení měření pro 3,1 kg materiálu

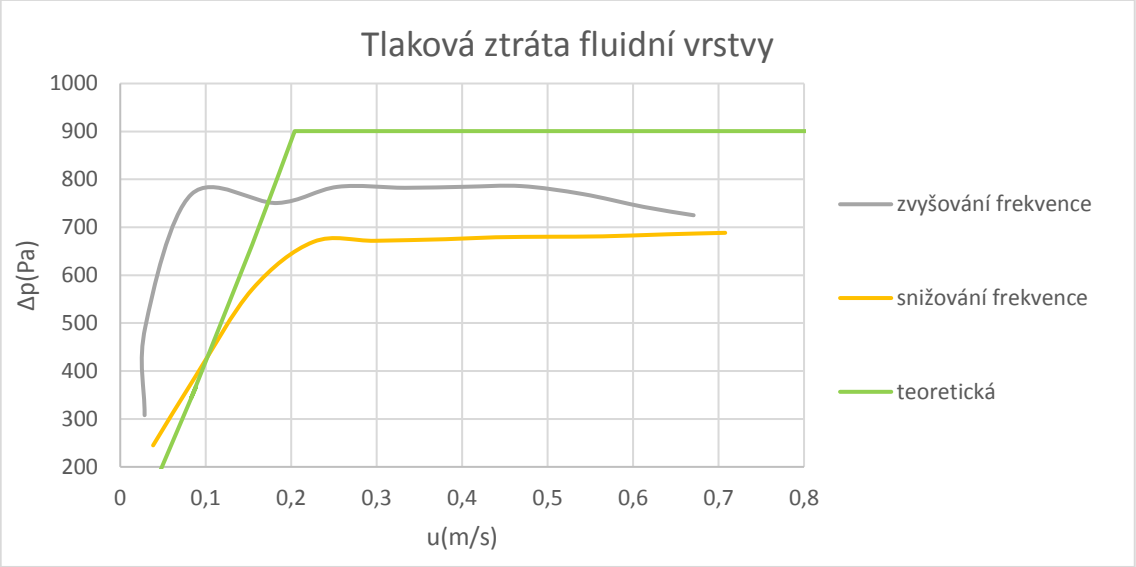
### 8.1.1 Křemenné písky

#### *8.1.1.1 od 0,1 až 0,6 mm*



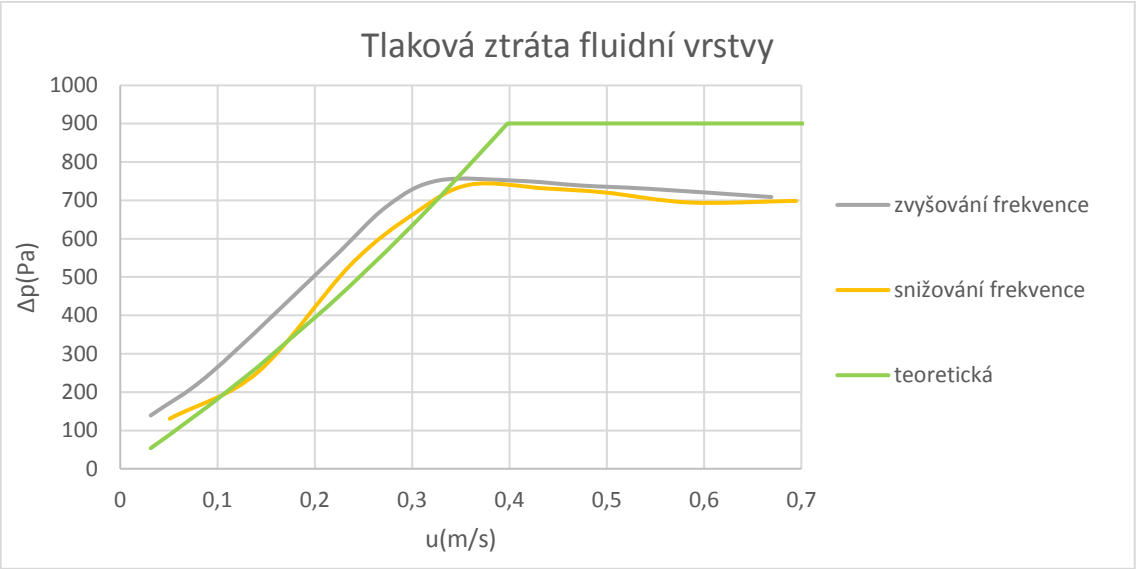

*Obrázek 8.1 Tlaková ztráta fluidní vrstvy písku v rozmezí 0,1 až 0,6 mm*

#### *8.1.1.2 od 0,3 až 0,8 mm*



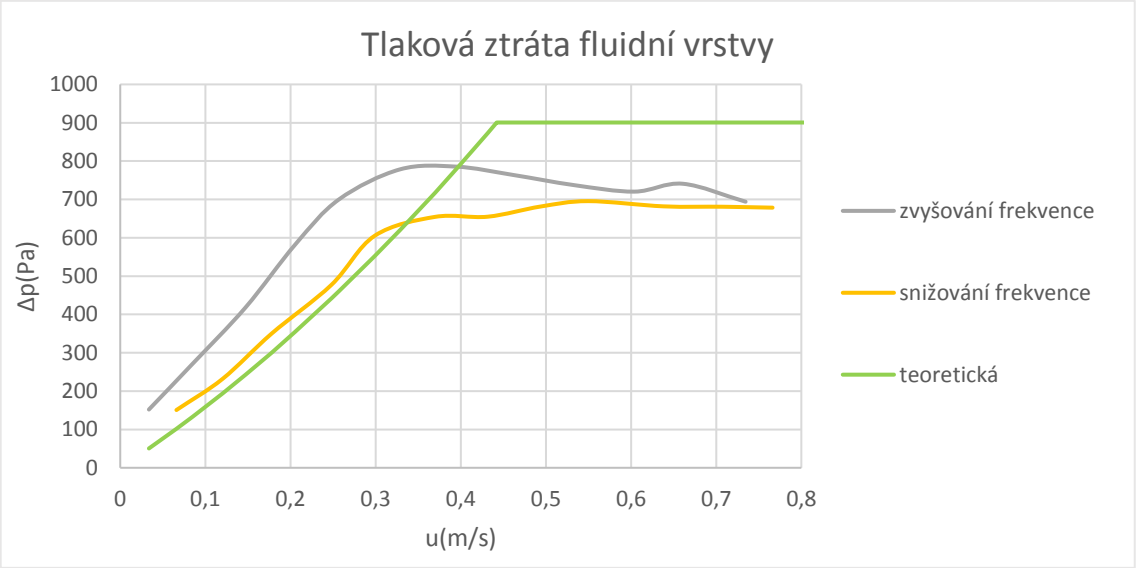

*Obrázek 8.2 Tlaková ztráta fluidní vrstvy písku v rozmezí 0,3 až 0,8 mm*

### 8.1.1.3 od 0,3 až 3 mm




*Obrázek 8.3 Tlaková ztráta fluidní vrstvy písku v rozmezí 0,3 až 3 mm*

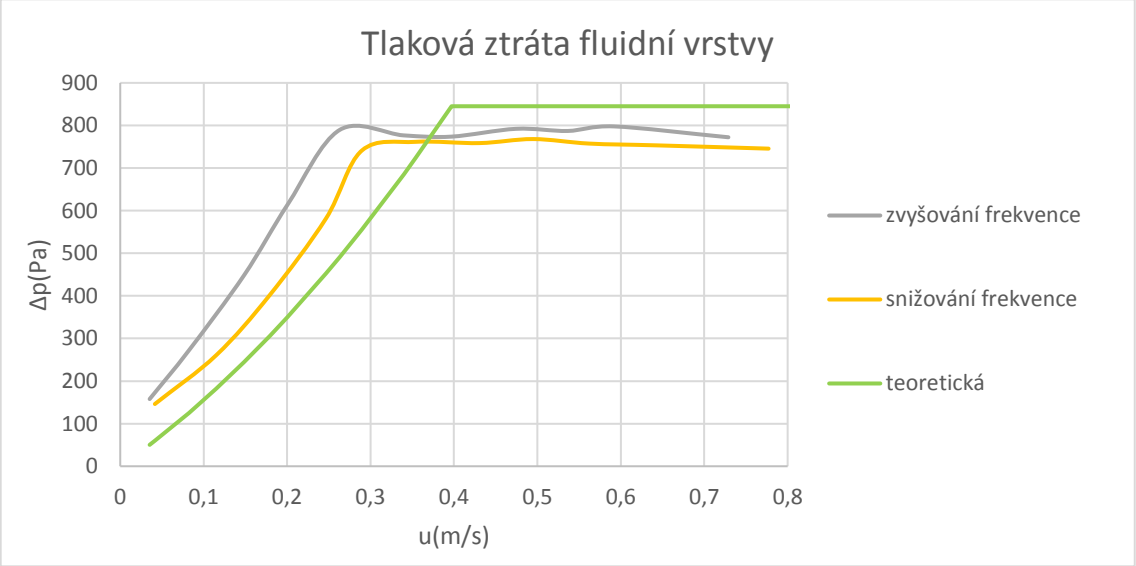
### 8.1.1.4 od 0,5 až 1 mm




*Obrázek 8.4 Tlaková ztráta fluidní vrstvy písku v rozmezí 0,5 až 1 mm*

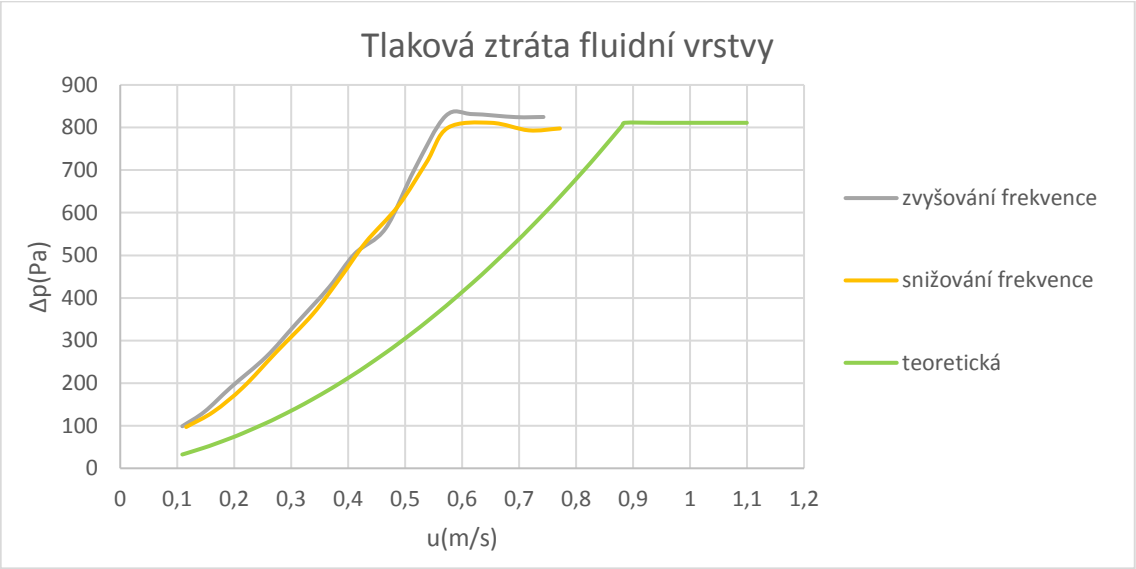
### 8.1.2 Keramzity

#### *8.1.2.1 od 0 až 2 mm*



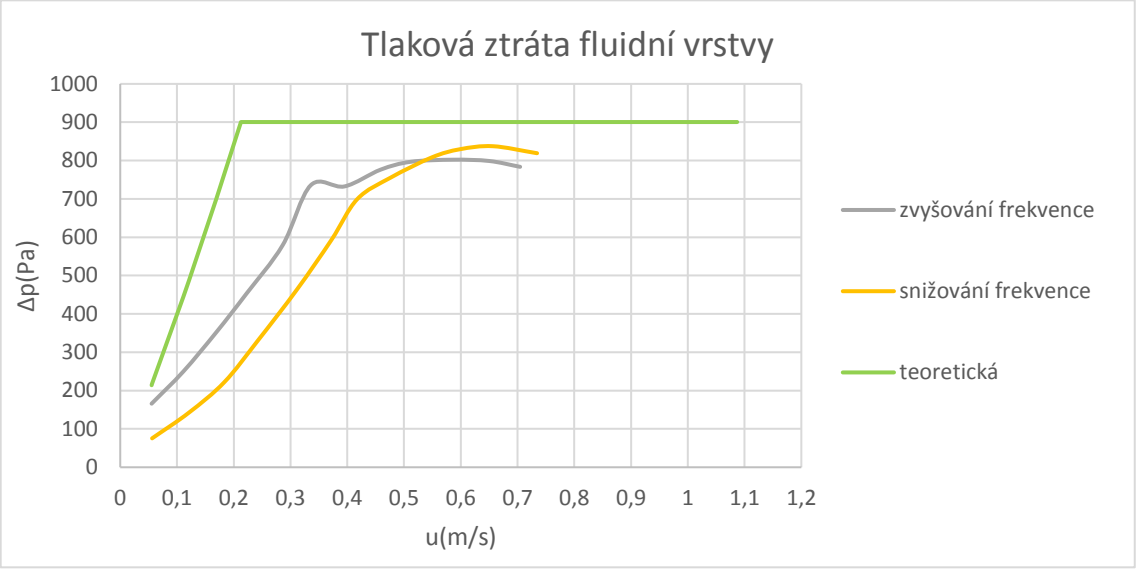

*Obrázek 8.5 Tlaková ztráta fluidní vrstvy keramzitu v rozmezí do 2 mm*

#### *8.1.2.2 od 2 až 4 mm*




*Obrázek 8.6 Tlaková ztráta fluidní vrstvy keramzitu v rozmezí 2 až 4 mm*

### 8.1.3 Popel s vysokým obsahem železa

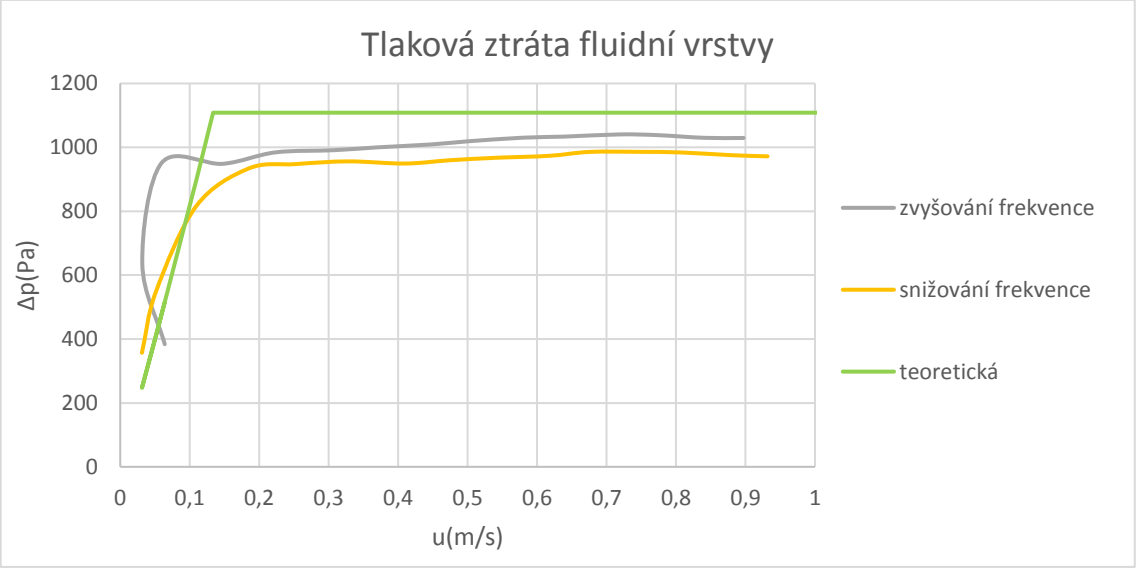



*Obrázek 8.7 Tlaková ztráta fluidní vrstvy popela*

## 8.2 Vyhodnocení měření pro 2,7 l materiálu

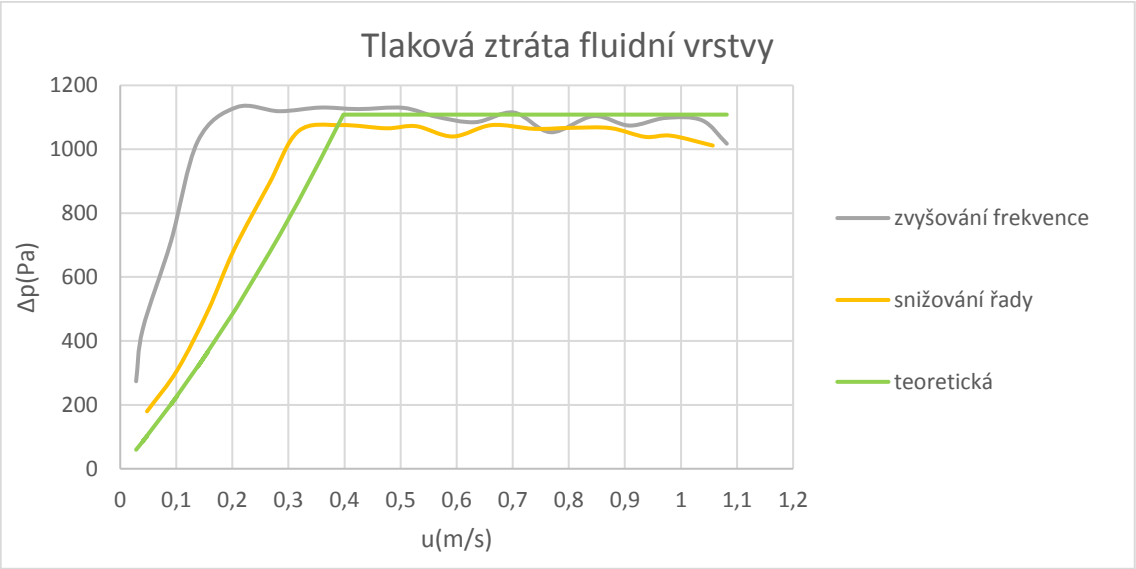
### 8.2.1 Křemenné písky

#### *8.2.1.1 od 0,1 až 0,6 mm*



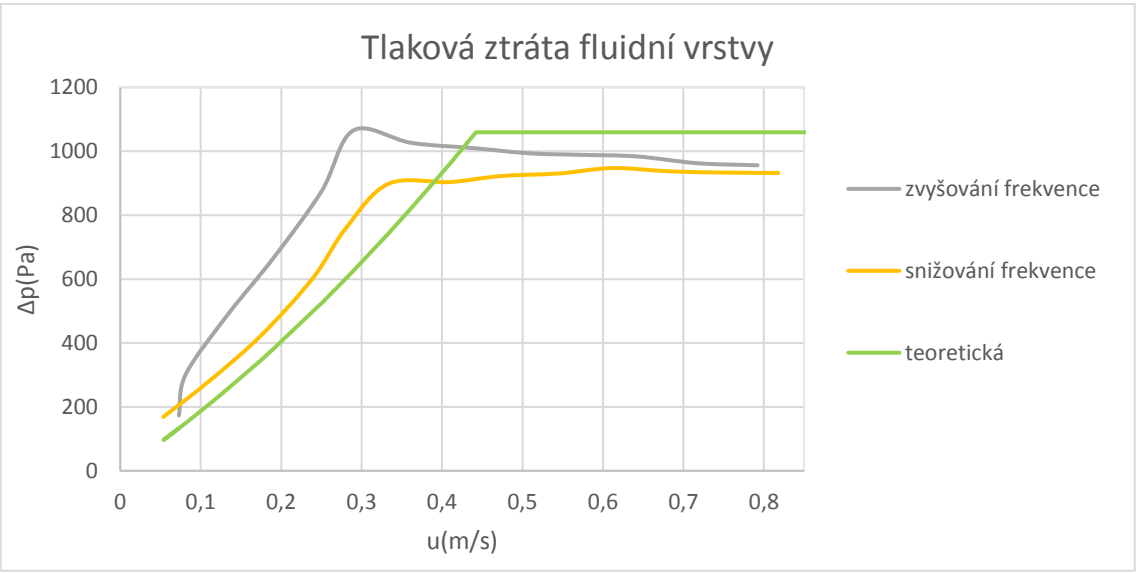

*Obrázek 8.8 Tlaková ztráta fluidní vrstvy písku v rozmezí 0,1 až 0,6 mm*

### 8.2.1.2 od 0,3 až 3 mm



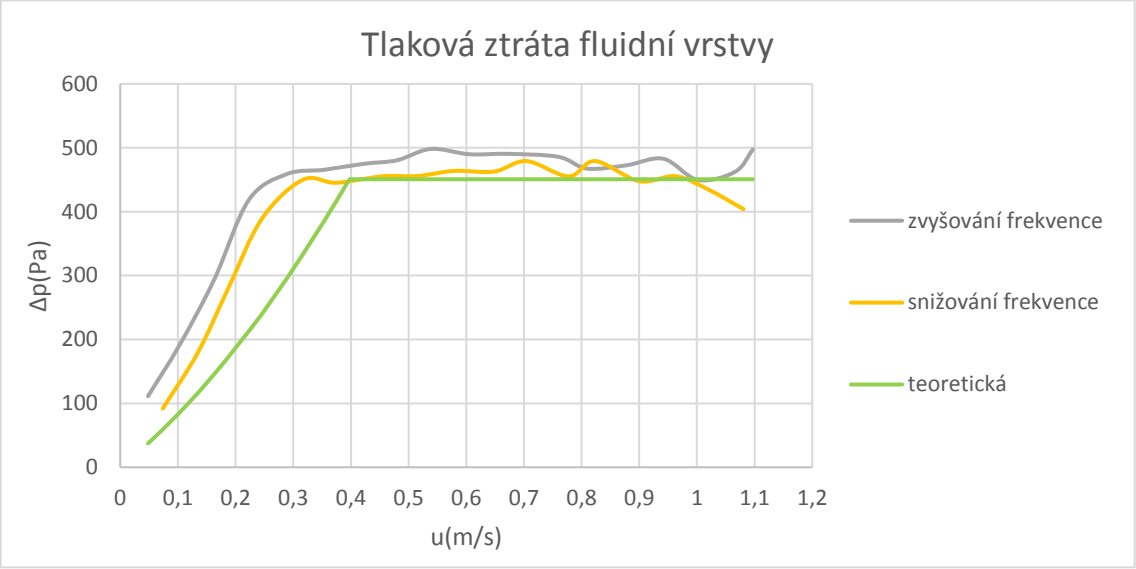

*Obrázek 8.9 Tlaková ztráta fluidní vrstvy písku v rozmezí 0,3 až 3 mm*

### 8.2.1.3 od 0,5 až 1 mm




*Obrázek 8.10 Tlaková ztráta fluidní vrstvy písku v rozmezí 0,5 až 1 mm*

### 8.2.2 Keramzit od 0 až 2 mm

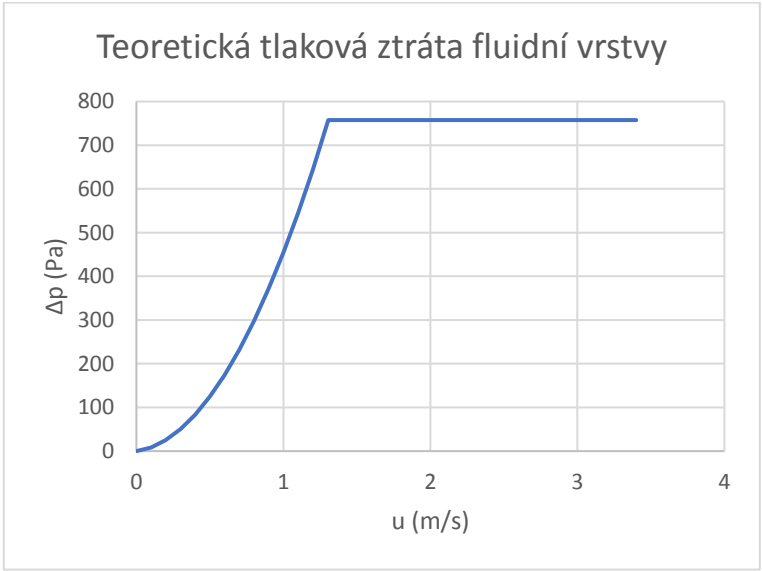



*Obrázek 8.11 Tlaková ztráta fluidní vrstvy keramzitu v rozmezí do 2 mm*

## 8.3 Teoretické vyhodnocení tlakové ztráty fluidní vrstvy pro vybrané materiály biomasy

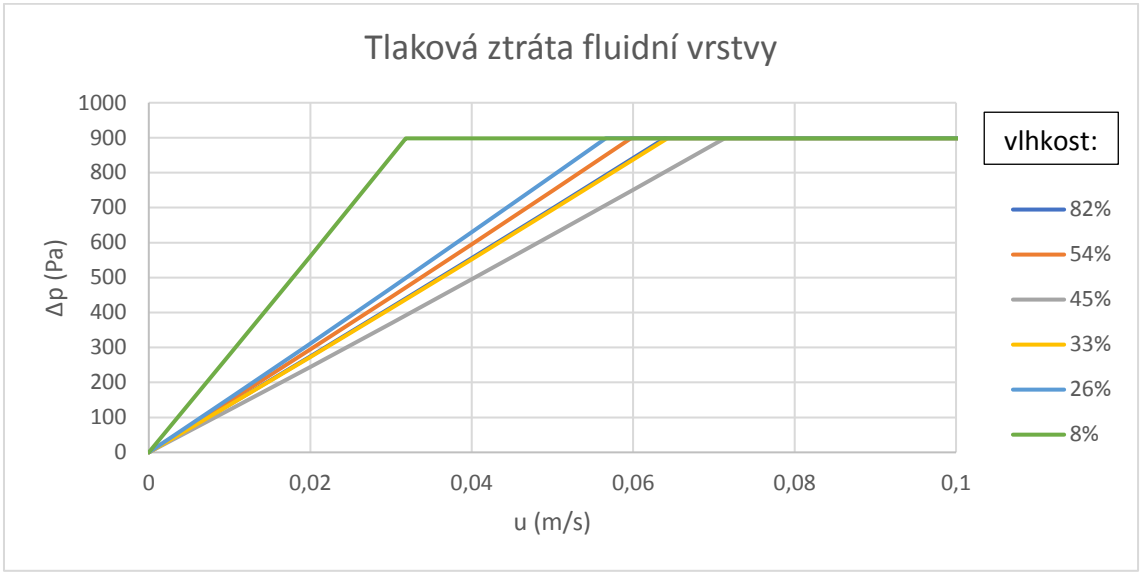
### 8.3.1 Vyhodnocení pro 3,1 kg materiálu

#### *8.3.1.1 Dřevní štěpka*



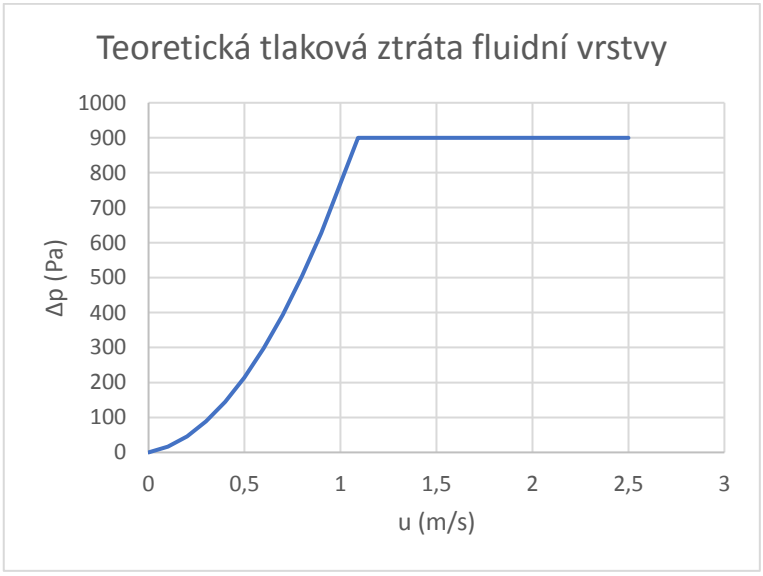

*Obrázek 8.12 Teoretická tlaková ztráta fluidní vrstvy dřevní štěpky*

### 8.3.1.2 Dřevní piliny



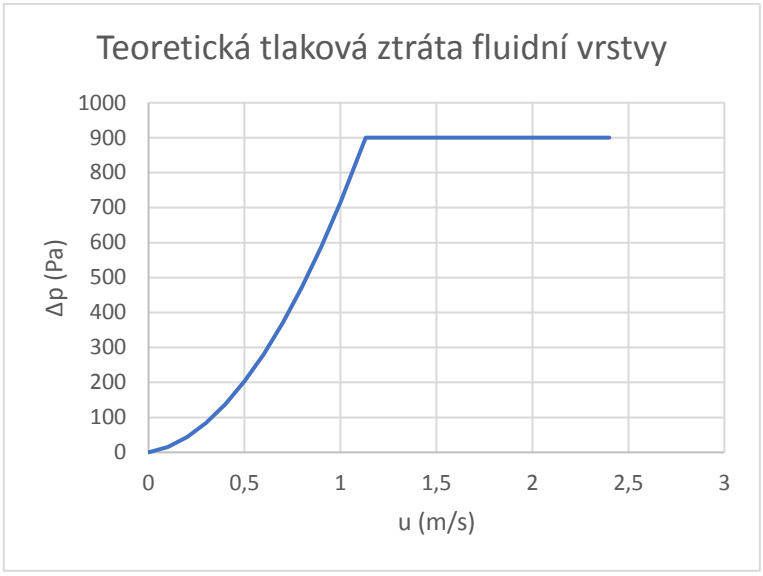

*Obrázek 8.13 Teoretická tlaková ztráty fluidních vrstev dřevní pilin v závislosti na vlhkosti*

### 8.3.1.3 Oves



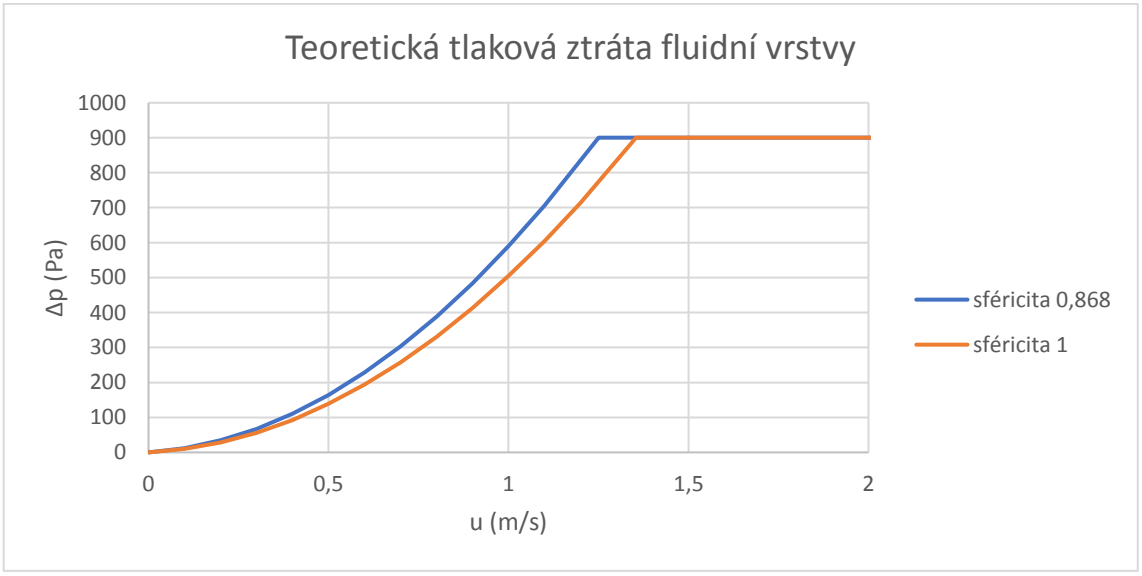

*Obrázek 8.14 Teoretická tlaková ztráta fluidní vrstvy ovsa*

### 8.3.1.4 Ječmen




*Obrázek 8.15 Teoretická tlaková ztráta fluidní vrstvy ječmene*

### 8.3.1.5 Hrách



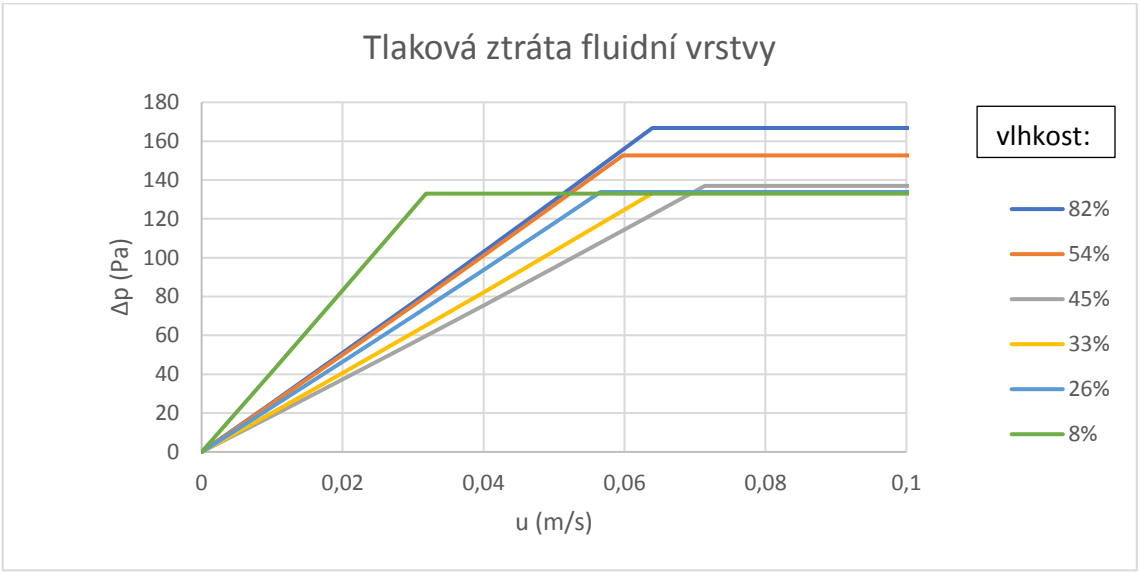

*Obrázek 8.16 Teoretická tlaková ztráta fluidní vrstvy hrachu*

### 8.3.2 Vyhodnocení pro 2,7 l materiálu

#### *8.3.2.1 Dřevní štěpka*

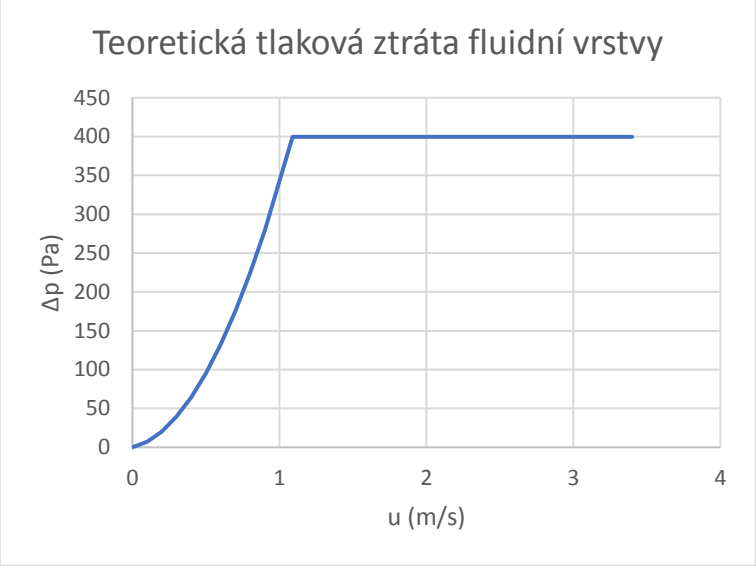
*Obrázek 8.17 Teoretická tlaková ztráta fluidní vrstvy dřevní štěpky*

#### *8.3.2.2 Dřevní piliny*



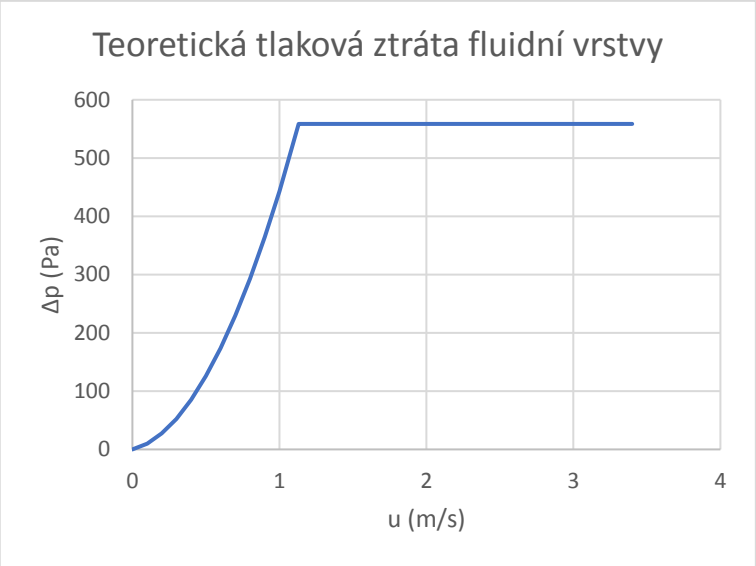

*Obrázek 8.18 Teoretická tlaková ztráta fluidních vrstev dřevních pilin v závislosti na vlhkosti*

#### 8.3.2.3 Oves



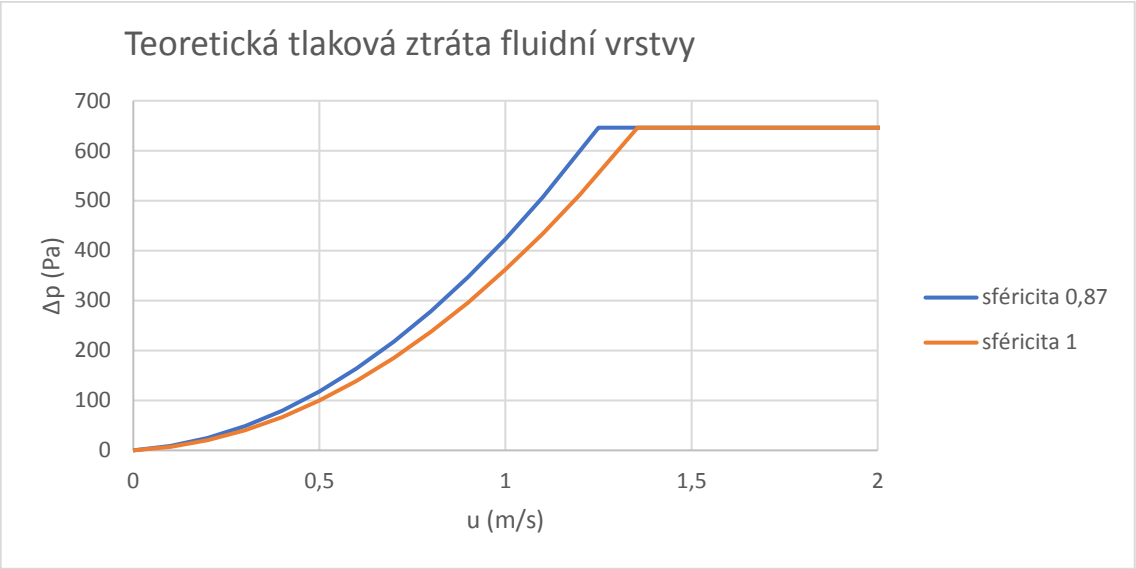

*Obrázek 8.19 Teoretická tlaková ztráta fluidní vrstvy ovsa*

#### 8.3.2.4 Ječmen



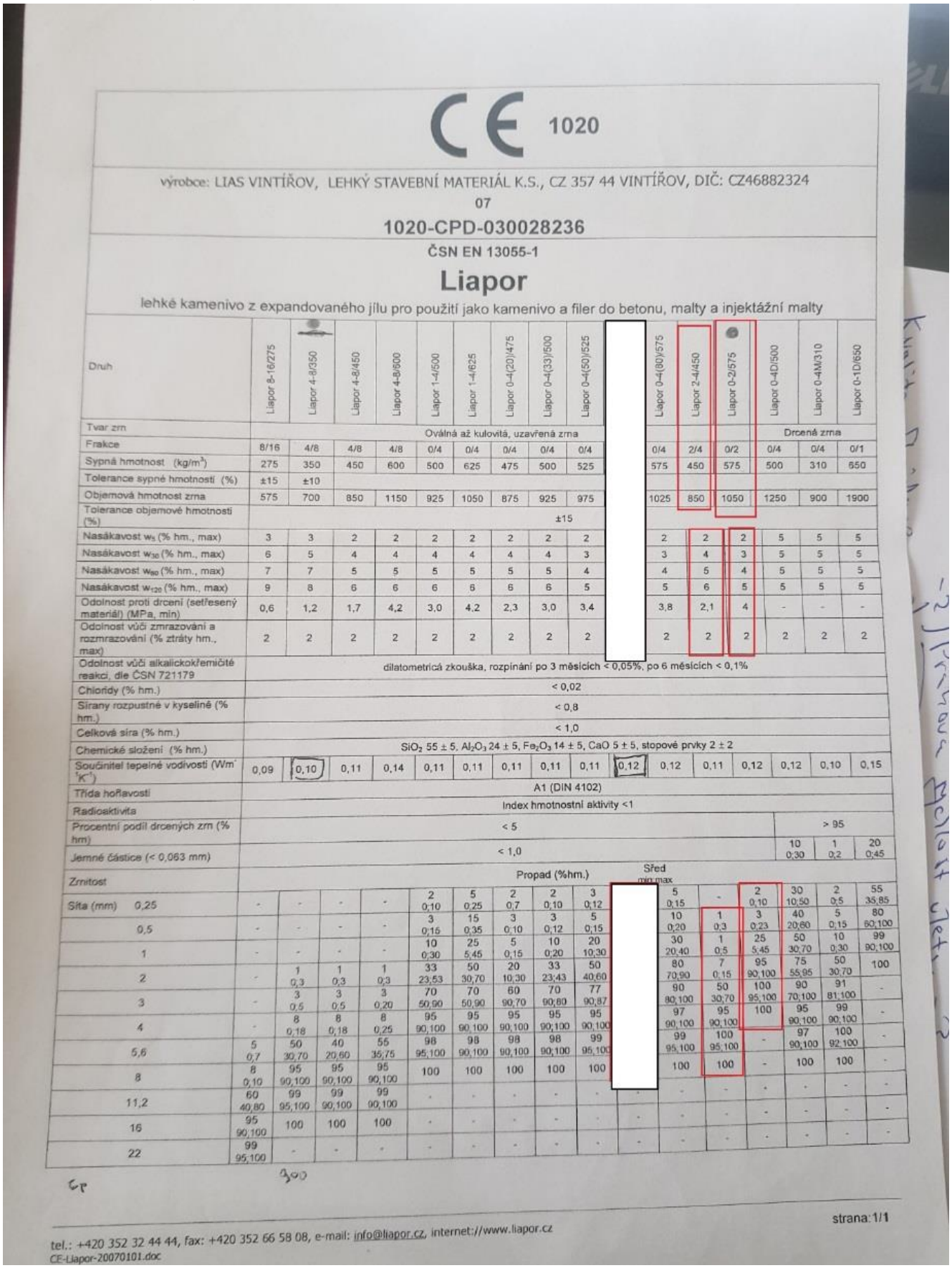

*Obrázek 8.20 Teoretická tlaková ztráta fluidní vrstvy ječmene*

#### 8.3.2.5 Hrách




*Obrázek 8.21 Teoretická tlaková ztráta fluidní vrstvy hrachu*

## 8.4 Keramzity Liapor



CE 1020

výrobce: LIAS VINTÍŘOV, LEHKÝ STAVEBNÍ MATERIÁL K.S., CZ 357 44 VINTÍŘOV, DIČ: CZ46882324

07

1020-CPD-030028236

ČSN EN 13055-1

**Liapor**

lehké kamenivo z expandovaného jílu pro použití jako kamenivo a filer do betonu, malty a injektážní malty

| Druh | Liapor 8-16/275 | Liapor 4-8/350 | Liapor 4-8/450 | Liapor 4-8/600 | Liapor 1-4/500 | Liapor 1-4/625 | Liapor 0-4(20)/475 | Liapor 0-4(33)/500 | Liapor 0-4(50)/525 | | Liapor 0-4(80)/575 | Liapor 2-4/450 | Liapor 0-2/575 | Liapor 0-4D/500 | Liapor 0-4M/310 | Liapor 0-1D/650 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tvar zrn | Oválná až kulovitá, uzavřená zrna | | | | | | | | | | | | | Drcená zrna | | |
| Frakce | 8/16 | 4/8 | 4/8 | 4/8 | 0/4 | 0/4 | 0/4 | 0/4 | 0/4 | | 0/4 | 2/4 | 0/2 | 0/4 | 0/4 | 0/1 |
| Sypná hmotnost (kg/m³) | 275 | 350 | 450 | 600 | 500 | 625 | 475 | 500 | 525 | | 575 | 450 | 575 | 500 | 310 | 650 |
| Tolerance sypné hmotnosti (%) | ±15 | ±10 | | | | | | | | | | | | | | |
| Objemová hmotnost zrna | 575 | 700 | 850 | 1150 | 925 | 1050 | 875 | 925 | 975 | | 1025 | 850 | 1050 | 1250 | 900 | 1900 |
| Tolerance objemové hmotnosti (%) | ±15 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Nasákavost $w_s$ (% hm., max) | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | | 2 | 2 | 2 | 5 | 5 | 5 |
| Nasákavost $w_{30}$ (% hm., max) | 6 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | | 3 | 4 | 3 | 5 | 5 | 5 |
| Nasákavost $w_{60}$ (% hm., max) | 7 | 7 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 |
| Nasákavost $w_{120}$ (% hm., max) | 9 | 8 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 5 | | 5 | 6 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Odolnost proti drcení (setřesený materiál) (MPa, min) | 0,6 | 1,2 | 1,7 | 4,2 | 3,0 | 4,2 | 2,3 | 3,0 | 3,4 | | 3,8 | 2,1 | 4 | - | - | - |
| Odolnost vůči zmrazování a rozmrazování (% ztráty hm., max) | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Odolnost vůči alkalickokřemičité reakci, dle ČSN 721179 | dilatometrická zkouška, rozpínání po 3 měsících < 0,05%, po 6 měsících < 0,1% | | | | | | | | | | | | | | | |
| Chloridy (% hm.) | < 0,02 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sírany rozpustné v kyselině (% hm.) | < 0,8 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Celková síra (% hm.) | < 1,0 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Chemické složení (% hm.) | $SiO_2$ 55 ± 5, $Al_2O_3$ 24 ± 5, $Fe_2O_3$ 14 ± 5, CaO 5 ± 5, stopové prvky 2 ± 2 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Součinitel tepelné vodivosti ($Wm^{-1}K^{-1}$) | 0,09 | 0,10 | 0,11 | 0,14 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,12 | 0,12 | 0,11 | 0,12 | 0,12 | 0,10 | 0,15 |
| Třída hořlavosti | A1 (DIN 4102) | | | | | | | | | | | | | | | |
| Radioaktivita | Index hmotnostní aktivity <1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Procentní podíl drcených zrn (% hm) | < 5 | | | | | | | | | | | | | > 95 | | |
| Jemné částice (< 0,063 mm) | < 1,0 | | | | | | | | | | | | | 10 0;30 | 1 0;2 | 20 0;45 |

| Zrnitost | | Propad (%hm.) | | | | | | | | | Střed min-max | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Síta (mm) | 0,25 | - | - | - | - | 2 0;10 | 5 0;25 | 2 0;7 | 2 0;10 | 3 0;12 | | 5 0;15 | - | 2 0;10 | 30 10;50 | 2 0;5 | 55 35;85 |
| | 0,5 | - | - | - | - | 3 0;15 | 15 0;35 | 3 0;10 | 3 0;12 | 5 0;15 | | 10 0;20 | 1 0;3 | 3 0;23 | 40 20;60 | 5 0;15 | 80 60;100 |
| | 1 | - | - | - | - | 10 0;30 | 25 5;45 | 5 0;15 | 10 0;20 | 20 10;30 | | 30 20;40 | 1 0;5 | 25 5;45 | 50 30;70 | 10 0;30 | 99 90;100 |
| | 2 | - | 1 0;3 | 1 0;3 | 1 0;3 | 33 23;53 | 50 30;70 | 20 10;30 | 33 23;43 | 50 40;60 | | 80 70;90 | 7 0;15 | 95 90;100 | 75 55;95 | 50 30;70 | 100 |
| | 3 | - | 3 0;5 | 3 0;5 | 3 0;20 | 70 50;90 | 70 50;90 | 60 90;70 | 70 90;80 | 77 90;87 | | 90 80;100 | 50 30;70 | 100 95;100 | 90 70;100 | 91 81;100 | - |
| | 4 | - | 8 0;18 | 8 0;18 | 8 0;25 | 95 90;100 | 95 90;100 | 95 90;100 | 95 90;100 | 95 90;100 | | 97 90;100 | 95 90;100 | 100 | 95 90;100 | 99 90;100 | - |
| | 5,6 | 5 0;7 | 50 30;70 | 40 20;60 | 55 35;75 | 98 95;100 | 98 90;100 | 98 90;100 | 98 90;100 | 99 95;100 | | 99 95;100 | 100 95;100 | - | 97 90;100 | 100 92;100 | - |
| | 8 | 8 0;10 | 95 90;100 | 95 90;100 | 95 90;100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | | 100 | 100 | - | 100 | 100 | - |
| | 11,2 | 60 40;80 | 99 95;100 | 99 90;100 | 99 90;100 | - | - | - | - | - | | - | - | - | - | - | - |
| | 16 | 95 90;100 | 100 | 100 | 100 | - | - | - | - | - | | - | - | - | - | - | - |
| | 22 | 99 95;100 | - | - | - | - | - | - | - | - | | - | - | - | - | - | - |

tel.: +420 352 32 44 44, fax: +420 352 66 58 08, e-mail: info@liapor.cz, internet://www.liapor.cz

strana:1/1

CE-Liapor-20070101.doc

*Obrázek 8.22 Údaje o keramzitech Liapor*