

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV ENERGETIKY



**SUŠENÍ BIOMASY V HORKOVZDUŠNÉ
SUŠCE**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2024

TOMÁŠ HEJDUK

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hejduk** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **491496**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Energetika a procesní inženýrství**
Specializace: **Energetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Sušení biomasy v horkovzdušné sušce

Název diplomové práce anglicky:

Drying of biomass in a hot air dryer

Pokyny pro vypracování:

Sestavte bilanční model pro sušení dřevní štěpky v horkovzdušné sušce a proveďte vyhodnocení vlivu rychlosti sušicího média na její provoz.

Práce bude obsahovat:

1. Zpracování rešerše typů sušek vhodných pro biomasu a popis procesu sušení.
2. Popis procesu fluidace a sušení materiálu ve fluidních horkovzdušných suškách.
3. Vytvoření bilančního modelu horkovzdušné sušky se začleněním recirkulace sušicího vzduchu.
4. Provedení série sušících experimentů s dřevní štěpkou a jejich vyhodnocení.
5. Vyhodnocení vlivu rychlosti sušicího média na rychlost sušení a provoz sušky.

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: **15.04.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **03.06.2024**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2025**

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

prof. Ing. Michal Kolovratník, CSc.
podle vedoucí(ho) katedry/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

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

V Praze dne

.....

Tomáš Hejduk

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Havlíkovi, Ph.D. za poskytnutí potřebných rad, informací, podkladů a za bezproblémovou komunikaci při řešení této diplomové práce.

Anotační list

Jméno autora:	Bc. Tomáš
Příjmení autora:	Hejduk
Název práce česky:	Sušení biomasy v horkovzdušné sušce
Název práce anglicky:	Drying of biomass in a hot air dryer
Ústav:	Ústav energetiky
Vedoucí práce:	Ing. Jan Havlík, Ph.D.
Rozsah práce:	počet stran: 94 počet obrázků: 49 počet tabulek: 15
Akademický rok:	2023/2024
Klíčová slova:	sušení, biomasa, fluidace, sušárna, horkovzdušná sušárna, sušicí médium, dřevní štěpka
Klíčová slova anglicky:	drying, biomass, fluidization, dryer, hot air dryer, drying medium, wood chips
Anotace česky:	Tato diplomová práce se zabývala sušením biomasy v horkovzdušných sušárnách. V práci byly popsány druhy sušáren a proces sušení. Samostatná část byla věnována problematice fluidního sušení a různým typům fluidních sušáren. V další části byl vytvořen bilanční model horkovzdušné sušárny se začleněním recirkulace sušicího vzduchu a byla vypočtena kinetika sušení pomocí rovnic dostupných z odborné literatury. V experimentální části byla provedena řada měření s cílem vyhodnotit kinetiku sušení při změně různých parametrů sušení, a především při změně rychlosti proudění pro různé velikosti částic sušeného materiálu. Na závěr byl vyhodnocen vliv rychlosti proudění sušicího média a zařazení recirkulace odchozího vzduchu na rychlost sušení a na provoz sušárny.

Anotace anglicky:

This diploma thesis dealt with the drying of biomass in hot air dryers. The thesis described the types of dryers and the drying process. A separate section was dedicated to the issues of fluidized bed drying and various types of fluidized bed dryers. In another section, a mass balance model of a hot air dryer was developed, incorporating the recirculation of drying air, and the drying kinetics were calculated using equations available from the expert literature. In the experimental part, a series of measurements were conducted to evaluate the drying kinetics when changing various drying parameters, particularly the airflow velocity for different sizes of dried material particles. Finally, the influence of airflow velocity and the inclusion of recirculation of outgoing air on the drying rate and the operation of the dryer was assessed.

Seznam použitých symbolů

Dolní indexy

<i>w</i>	Voda
<i>suš</i>	Sušina
<i>mat</i>	Materiál
<i>sv</i>	Suchý vzduch
<i>v</i>	Vzduch
<i>vv</i>	Vlhký vzduch
	Mokrý
<i>wb</i>	Teploměr
<i>obj</i>	Objem
<i>s</i>	Pevná část
<i>g</i>	Plyn

Symbols

Q_i	[kJ/kg]	Výhřevnost
Q_s	[kJ/kg]	Spalné teplo
W	[% , 1]	Obsah vody
H	[% , 1]	Obsah vodíku
m	[kg]	Hmotnost
φ	[% , 1]	Vlhkost
T	[K]	Termodynamická teplota
t	[°C]	Teplota
ΔW	[kg _w /kg _{mat}]	Měrné odsušení
\dot{m}	[kg/s]	Hmotnostní tok
X	[kg _w /kg _{sv}]	Měrná vlhkost vzduchu
Q	[J]	Teplo
c_p	[kJ/kg · K]	Měrná tepelná kapacita
o_s	[kg _{vody} /hod · m ²]	Měrná plošná odpařivost
o_v	[kg _{vody} /hod · m ³]	Měrná objemová odpařivost
Δp	[Pa]	Tlaková ztráta
H	[m]	Výška vrstvy
ε	[–]	Mezerovitost

μ	$[Pa \cdot s]$	Dynamická viskozita
Φ	$[-]$	Sféricita
D	$[m]$	Průměr
u	$[m/s]$	Rychlost proudění
g	$[m/s^2]$	Gravitační zrychlení
ρ	$[kg/m^3]$	Hustota
ρ_{syp}	$[kg/m^3]$	Sypná hmotnost
Re	$[-]$	Reynoldsovo číslo
Ar	$[-]$	Arheniovo číslo
Nu	$[-]$	Nusletovo číslo
α	$[W/m^2 \cdot K]$	Součinitel přestupu tepla
α_V	$[W/m^3 \cdot K]$	Objemový součinitel přestupu tepla
ΔT_{ln}	$[K]$	Logaritmický teplotní spád
S	$[m^2]$	Plocha
V	$[m^3]$	Objem
λ	$[W/m \cdot K]$	Tepelná vodivost
\dot{Q}	$[W]$	Výkon
E	$[J/kg]$	Teoretická náročnost sušení
h	$[J/kg]$	Entalpie
R	$[-]$	Recirkulační číslo

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Biomasa.....	12
2.1	Dělení biomasy.....	12
2.2	Výhřevnost a spalné teplo biomasy.....	12
2.3	Voda obsažená v palivu.....	15
2.4	Adsorpce a desorbce.....	16
3	Proces sušení materiálu v horkovzdušných sušárnách.....	16
3.1	Fáze sušení	17
3.2	Statika sušení.....	19
3.3	Kinetika sušení	21
3.4	Faktory ovlivňující rychlost sušení	22
3.5	Sušárny	23
4	Fluidace	32
4.1	Tlaková ztráta fluidní vrstvy	32
4.2	Výpočet prahové rychlosti fluidace.....	33
4.3	Typy fluidních vrstev	34
4.4	Geldartova klasifikace částic.....	36
5	Fluidní sušení	38
5.1	Kinetika fluidního sušení	38
5.2	Vybrané typy fluidních sušáren.....	40
5.3	Kontinuální sušárna.....	42
6	Výpočet bilance horkovzdušné sušárny	43
6.1	Okrajové podmínky výpočtu.....	43
6.2	Statické výpočty sušeného materiálu	45
6.3	Statické výpočty sušícího vzduchu při fluidním sušení	45

6.4	Tepelná bilance	47
6.5	Statika fluidního sušení s recirkulací odchozího vzduchu	49
6.6	Fluidační charakteristiky	51
6.7	Kinetika sušení	52
7	Experimentální měření na horkovzdušné sušárně	56
7.1	Průběh měření	56
7.2	Parametry jednotlivých měření	62
7.3	Vzorové vyhodnocení měření	65
7.3.2	Určení součinitele přestupu tepla a měrné objemové odpařivosti.....	66
7.4	Vyhodnocení sušicí křivky a křivky rychlosti sušení.....	67
7.5	Vyhodnocení experimentu	69
8	Vyhodnocení vlivu rychlosti sušicího média na rychlost sušení a provoz sušárny	83
9	Závěr.....	87
10	Seznam obrázků	90
11	Seznam tabulek	92
12	Seznam literatury.....	93

1 Úvod

S rostoucí poptávkou po obnovitelných zdrojích energie a s cílem potlačit produkci emisí skleníkových plynů na minimum je stále větší zájem o efektivní a udržitelné využití biomasy jako paliva.

Sušení je proces, při kterém se sušený materiál zbavuje přebytečné vody. Voda může tvořit při čerstvě zpracované biomase až 60 % celkové hmotnosti, čímž se značně snižuje její energetická výtěžnost. Velký obsah vody v biomase jako palivu při spalování má řadu nevýhod, mezi které patří např. nízká výhřevnost, snížená kvalita spalování a velký objem spalin. Všechny tyto nevýhody mají zásadní vliv na ekonomiku provozování energetických zařízení. Mezi nevýhody sušení patří fakt, že se jedná o energeticky náročný proces, který se může jevit zajímavý především při využití odpadního tepla.

Horkovzdušné sušárny nejsou tak rozšířené jako klasické sušárny. V případech, kdy se rychlost proudění sušicího média bude zvyšovat, může se sušený materiál dostat do stavu fluidace, která má nesporné výhody. Mezi ně například patří velmi intenzivní přenos tepla a dobré promíchávání materiálu. Naopak jako nevýhodu lze uvést nutnost použití homogenního materiálu s vhodnou velikostí částic i přestože je fluidace některých materiálů velmi obtížná.

Tato diplomová práce se zabývala sušením biomasy v horkovzdušné sušárně. Byla zpracována rešerše dostupných sušáren vhodných pro sušení biomasy a byl popsán proces sušení, který se skládá z několika fází. V horkovzdušných sušárnách může docházet vlivem proudění k procesu fluidace, proto byl v práci popsán proces fluidace a bylo zde také popsáno sušení materiálu ve fluidních horkovzdušných sušárnách.

Experimentální část se zabývala vytvořením bilančního modelu sušení se začleněním recirkulace odchozího vzduchu. Dále byla provedena řada experimentů s různými materiály, s cílem ukázat vliv rychlosti proudění a případný přínos fluidace na dobu sušení. Byly vyhodnoceny součinitelé přestupu tepla a objemové odpařivosti pro jednotlivá měření. V poslední kapitole byl opět diskutován vliv rychlosti a nastavení recirkulace vzduchu na dobu sušení a na provoz horkovzdušné sušárny.

2 Biomasa

Pojem biomasa zahrnuje veškerý materiál organického původu, který obsahuje uhlovodíky. Biomasou se označuje v přírodě žijící fytomasa a zoomasa (rostliny a živočichové), produkty a zbytky jejich existence. Dále se sem řadí i veškerý materiál, který vznikl jejich technologickou přeměnou, například organickou část domovního odpadu, odpady z jatek, papír. Také sem patří odumřelá, ale nikoliv fosilní biomasa fytomasa a zoomasa, například sláma a suché listí. [1]

Biomasa je obnovitelný zdroj energie, ale na rozdíl od sluneční nebo větrné energie může být vyčerpatelná, čerpá-li se rychleji, než se stihne obnovit. [2]

Energetické využívání biomasy není bezemisní, ale takzvaně CO₂ neutrální. Spálením biomasy se do ovzduší uvolní přibližně stejné množství CO₂, jaké je potřebné k přirozenému růstu. [2]

2.1 Dělení biomasy

Biomasu lze dělit podle nejrůznějších faktorů:

- primární a sekundární biomasa

V případě primární biomasy se jedná o materiál vzniklý přímou fotosyntézou. Patří sem dřevní biomasa, veškeré produkty a zbytky lesního a zemědělského průmyslu. Jako sekundární biomasu označujeme všechny organické produkty, které vznikly bez přímého působení slunečního záření. [1]

- suchá a mokrá biomasa

Jako suchou biomasu označujeme materiál vhodný typicky pro termochemickou přeměnu (spalování, zplyňování a pyrolýzu). Patří sem dřevní a zemědělská biomasa a její zbytky. Jako mokrá biomasa se označuje kombinace ostatní primární a sekundární biomasy např. zbytky z papírenského, dřevozpracujícího, potravinářského průmyslu a čistírenské kaly. Tento typ biomasy je vhodný pro fermentaci a hydrotermální konverzi. [1]

2.2 Výhřevnost a spalné teplo biomasy

Biomasa má ve srovnání s tradičními fosilními palivy nízkou energetickou hustotu, a to především díky vysokému obsahu vody.

Pojem výhřevnost Q_i je definován jako množství tepla, které se uvolní dokonalým spálením 1 kg paliva, a ochlazením produktů spalování na 20 °C, přičemž vzniklá vodní pára, nekondenzuje a zůstává v plynné fázi. [3]

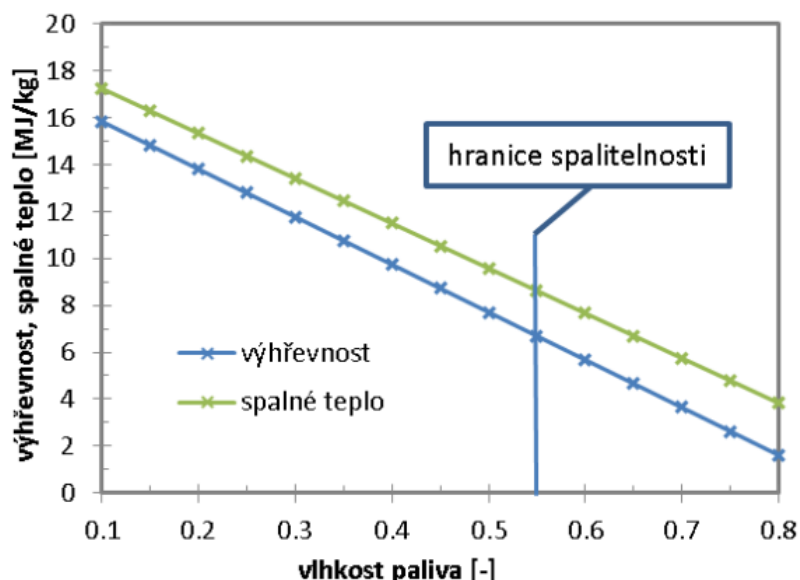
Spalné teplo Q_s je definováno jako celkové latentní chemicky vázané teplo v palivu vztažené k výchozí teplotě 20 °C a to včetně kondenzačního tepla vodní páry ve spalinách. [3]

Vztah mezi výhřevností a spalným teplem

$$Q_i = Q_s - 2453 \cdot (W + 8,94 \cdot H) \quad (2.1)$$

Biomasa vysušená na vzduchu obsahuje okolo 20 % vody. Čerstvá kůra, zelené rostliny a čerstvě sklizená dřevní biomasa však obsahuje až 60 % vody. Jak již bylo zmíněno, výhřevnost paliva závisí zejména na obsahu vody. Výhřevnost sušiny rostlinné biomasy se obvykle pohybuje okolo 18,5 MJ/kg, dřevní biomasa vysušená na vzduchu má výhřevnost cca 17 MJ/kg. [1], [3]

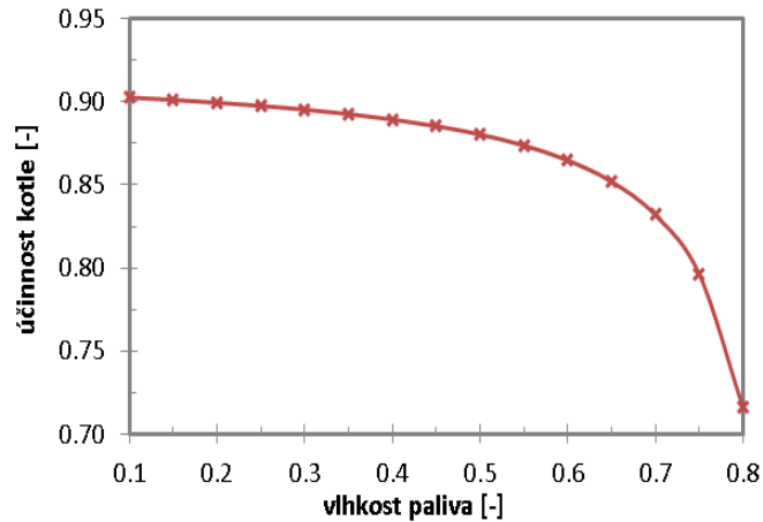
Obsah vody v palivu má zásadní vliv na výhřevnost a spalné teplo. Při spalování je nejprve nutné vodu v palivu vypařit a tím se sníží základní výhřevnost sušiny biomasy. Vliv obsahu vlhkosti v palivu na hodnoty výhřevnosti a spalného tepla lesní štěpky je zobrazen na obrázku 1.



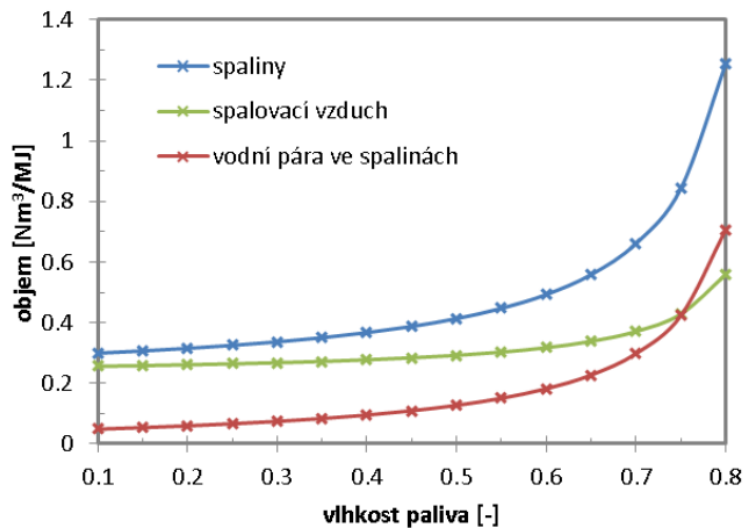
Obrázek 1: Závislost výhřevnosti a spalného tepla na vlhkosti paliva [4]

Obsah vody v palivu má vliv i na zásadní faktory při spalování jako je účinnost kotle, která klesá s rostoucím obsahem vlhkosti. Tato závislost je zobrazena na obrázku 2. Na

obrázku 3 je dále zobrazena závislost vlhkosti paliva na množství spalin, spalovacího vzduchu a obsahu vodní páry ve spalinách.



Obrázek 2: Závislost účinnosti kotle na vlhkosti paliva [4]



Obrázek 3: Závislost objemu spalin na vlhkosti paliva [4]

Spalování vlhkého paliva může dále způsobit nestabilitu hoření, zkrácení živostnosti kotle, zvýšení teploty rosného bodu, snížení teploty adiabatické teploty nechlazeného plamene a také vyšší dopravní a skladovací náklady. [4]

2.3 Voda obsažená v palivu

Vodu obsaženou v palivu lze dělit na vodu hrubou a na vodu zbytkovou. Obsah vody v palivu se určuje laboratorně a je vázán následujícími způsoby:

a) Přimíšená voda

Jde o vodu, která se dá z paliva odstranit mechanicky, odkapáním nebo odstředěním. Nepovažujeme ji za původní část paliva.

b) Hrubá voda

Obsah hrubé vody získáme z úbytku hmotnosti vzorku jeho sušením na vzduchu při teplotě 18 až 20 °C a relativní vlhkosti vzduchu kolem 50 %.

c) Zbylá voda

Jedná se vodu kapilárně vázanou v palivu, která zbyla po odpaření vody hrubé. Její obsah lze určit z úbytku hmotnosti po sušení ve vzdušné sušárně při teplotě 105 až 110 °C.

d) Veškerá voda

Tento pojem označuje součet hrubé a zbylé vody v palivu. Její hodnota je uvedena v technických rozbořech.

e) Hydrátová a okludová voda

Okludová voda je malé množství vody vázané na hořlavinu paliva. V technickém rozboru paliva se započítává do prchavé hořlaviny. Hydrátová voda je nepatrné množství vody vázané v krystalech minerálů a při rozboru se řadí k popelovinám. [3]

Podíl vody v palivu lze vyjádřit pomocí následujících pojmů:

2.3.1 Obsah vody v palivu [1], [3]

Obsah vody je určený poměrem vody W_r k počáteční hmotnosti vlhkého materiálu m_r

$$W = \frac{m_w}{m_w + m_{suš}} \quad (2.2)$$

2.3.2 Vlhkost [1], [3]

Jedná se o obsah vody v palivu vztažený pouze k hmotnosti sušiny

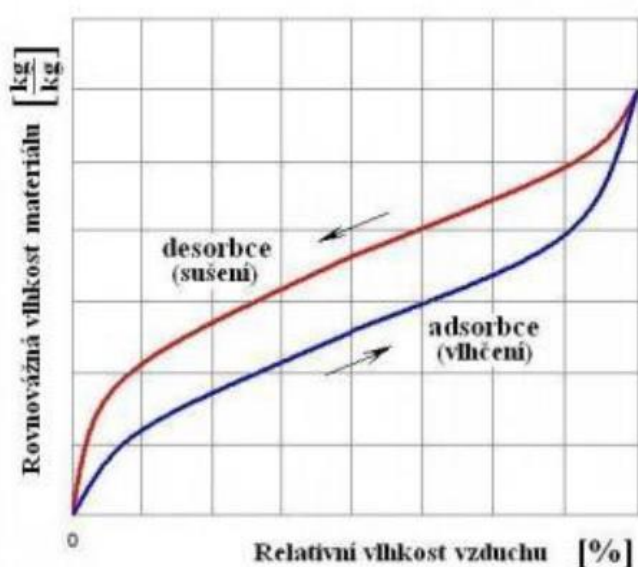
$$\varphi_{mat} = \frac{m_w}{m_{suš}} \quad (2.3)$$

Vzájemný přepoččet vlhkosti na obsah vody umožňuje vztah

$$W = \frac{\varphi_{mat}}{1 + \varphi_{mat}} \quad (2.4)$$

2.4 Adsorpce a desorbce

Adsorpce a desorbce jsou vlastnosti materiálu popisující jeho schopnost pohlcovat a udržovat vlhkost z okolního prostředí. Závisí na vlhkosti a teplotě okolního prostředí. Tyto vlastnosti se charakterizují rovnovážnou vlhkostí. Sorpční izoterma popisuje proces sušení, nebo vlhčení materiálu závislé na vztahu mezi relativní vlhkostí vzduchu a materiálu. Tato závislost udává, jaké nejmenší vlhkosti materiálu lze dosáhnout při konvektivním sušení vzduchem s relativní vlhkostí. Sorpční izoterma také popisuje průběh parciálního tlaku vodní páry na povrchu sušeného materiálu během všech fází sušení, což je jedna z veličin popisující kinetiku sušení. [5], [6]



Obrázek 4: Závislost rovnovážné vlhkosti materiálu na relativní vlhkosti vzduchu [6]

3 Proces sušení materiálu v horkovzdušných sušárnách

Sušením se rozumí fyzikální proces, při kterém dochází k odstraňování nežádoucího obsahu vody z materiálů do ovzduší pomocí tepla cestou jejího odpaření. Při sušení probíhají vzájemně provázané procesy přenosu tepla a hmoty mezi materiálem a sušicím médiem. V první fázi sušení se materiál musí ohřát na teplotu sytosti vody. Rychle dochází k odpaření vlhkosti na povrchu materiálu a narušuje se rovnováha vlhkosti. Vnitřní část materiálu má vyšší obsah vlhkosti, a také nižší teplotu než povrchové vrstvy. Vlivem rozdílů obsahu vlhkosti

povrchových a vnitřních vrstev vzniká gradient vlhkosti. To vede k procesům difuze uvnitř materiálu (vnitřní přenos hmoty). Dochází k transportu vlhkosti z vnitřních, více vlhkých vrstev, k povrchovým vrstvám, kde dochází k jejímu odpařování z povrchu materiálu. Díky existenci gradientu vlhkosti dochází ke kontinuálnímu poklesu vlhkosti v celém objemu sušeného materiálu. Po vypaření vlhkosti z celého objemu se teplota materiálu zvyšuje směrem k teplotě okolí. Vyšší teplota zlepšuje přestup tepla a snižuje potřebné rozměry zařízení, ale současně se tím zvyšuje riziko vznícení materiálu. V praxi se materiál často nesuší až do úplného vysušení. [6], [7]

Přenos hmotnosti uvnitř materiálu ovlivňuje také termodifuze, která je dána rozdílem teplot. Jejím vlivem se vlhkost pohybuje od oblastí s vyšší teplotou do oblastí s nižší teplotou (v závislosti na tvaru sorpčních izoterm). Při sušení v nižších teplotách nemá termodifuze podstatný vliv. Naopak při sušení za vysokých teplot má značný vliv na proces sušení. Během konvektivního sušení brání termodifuze transportu vlhkosti z vnitřních vrstev k povrchu, protože teplota vnitřních vrstev je kvůli vyššímu obsahu vlhkosti nižší. Proto se pro případy vysokoteplotního sušení doporučuje použít oscilační režim se střídavými dodávkami studeného a horkého vzduchu. To zajišťuje stejný směr difuze a termodifuze vlhkosti a proces sušení se zrychlí. [5], [6]

Při sušení, které probíhá za teplot vyšších, než je teplota sytosti vody, dochází k odpařování vlhkosti v celém objemu materiálu. Vlhkost uvnitř materiálu se pak pohybuje k povrchu ve formě vodní páry. To vede ke vzniku tlakového gradientu, protože rychlost vypařování je rychlejší než rychlost jejího odvodu z povrchu materiálu. Tím dochází k urychlení transportu vlhkosti. Procesy přestupu tepla a přenosu hmoty uvnitř i vně sušeného materiálu jsou propojeny a vedou ke ztrátě hmotnosti materiálu během sušení. [6]

3.1 Fáze sušení

Proces sušení lze rozdělit do tří fází. Jednotlivé fáze, průběh obsahu vody a teplota sušícího vzduchu během sušení vzduchem jsou na obrázku 5.

3.1.1 Počáteční fáze

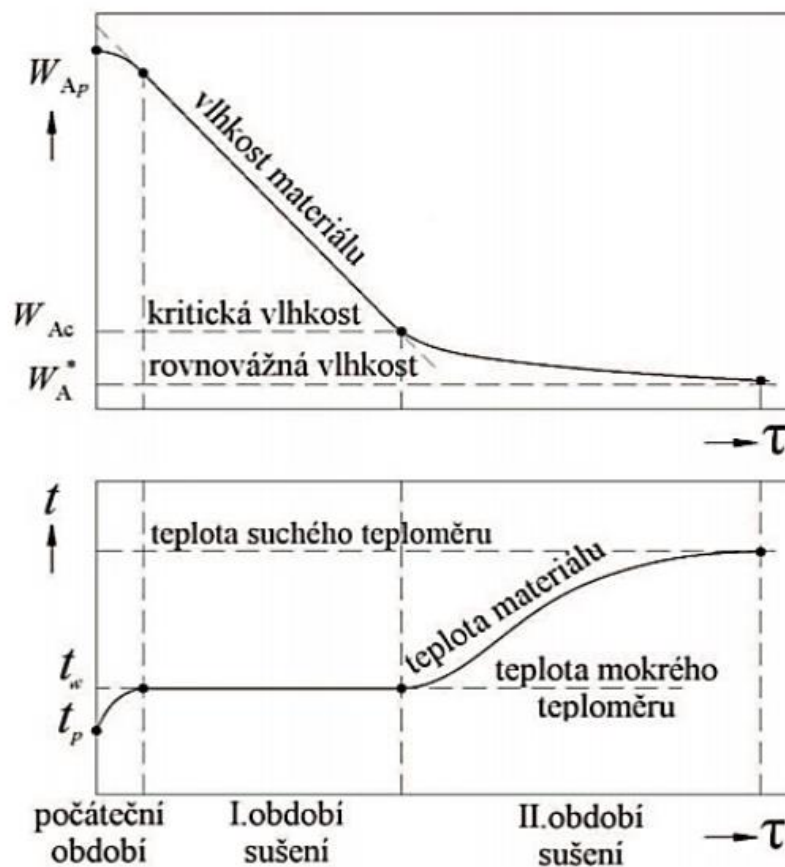
V počáteční fázi probíhá ohřev materiálu na teplotu sušení. Během této fáze nedochází k úbytku vody.

3.1.2 I. fáze

I. fáze sušení neboli ustálená fáze sušení se vyznačuje konstantní rychlostí sušení. Během této fáze zůstává konstantní také teplota tzv. teplota mokrého teploměru T_{wb} .

3.1.3 II. fáze

Koncová fáze sušení je charakteristická sníženou intenzitou procesu. Teplota materiálu roste a ke konci už neprobíhá proces sušení. [4], [6]



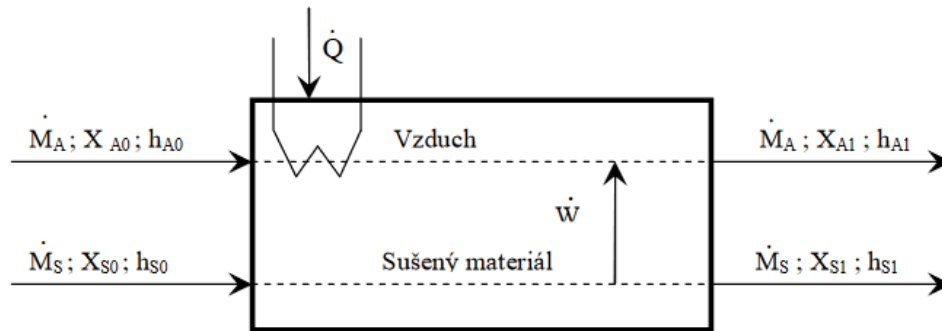
Obrázek 5: Sušicí křivka a průběh teplot při různých fázích konvektivního sušení [6]

Teplota mokrého teploměru T_{wb} (wb – wet bulb)

Teplota mokrého teploměru T_{wb} je teplota, kterou změří teploměr obalený mokrou punčoškou při nuceném obtékání vlhkým vzduchem. Charakterizuje teplotu při sušení volně vázané vody na materiál. Po odsušení volné vody se teplota může zvýšit až na teplotu sušícího vzduchu. Teplota mokrého teploměru se nedá snadno určit a v technických aplikacích ji lze aproximovat teplotou adiabatického sušení.

3.2 Statika sušení

Statika sušení řeší hmotnostní a energetické bilance sušícího média a sušeného materiálu. Cílem je určení hmotnostního toku sušícího média, výkon ohříváku vzduchu, účinnost sušení a měrné spotřeby tepla.



Obrázek 6: Schéma statiky konvektivního sušení [6]

Množství materiálu na vstupu m_{mat0} s obsahem vody W_0

Množství sušiny v sušeném materiálu

$$\dot{m}_{suš} = (1 - W_0) \cdot \dot{m}_{mat0} \quad (3.1)$$

Množství vody v sušeném materiálu

$$\dot{m}_{w0} = W_0 \cdot \dot{m}_{mat0} \quad (3.2)$$

Při sušení na požadovaný obsah vody W_1 , množství odsušené vody z materiálu Δm_w

Měrné odsušení

$$\Delta W = \frac{W_0 - W_1}{1 - W_1} \quad (3.3)$$

Množství odsušené vody

$$\Delta \dot{m}_w = \Delta W \cdot \dot{m}_{mat0} \quad (3.4)$$

Množství materiálu na výstupu

$$\dot{m}_{mat1} = \dot{m}_{pal0} - \Delta \dot{m}_w \quad (3.5)$$

$$\dot{m}_{mat1} = \dot{m}_{suš} + \dot{m}_{w1} \quad (3.6)$$

Množství vody v materiálu na výstupu

$$\dot{m}_{w1} = \dot{m}_{w0} - \Delta\dot{m}_w = W_1 \cdot \dot{m}_{mat1} \quad (3.7)$$

Bilance sušícího vzduchu

$$\Delta m_w = m_{sv} \cdot (X_{a1} - X_{a0}) \quad (3.8)$$

$$m_{sv} = \frac{\Delta m_w}{(X_1 - X_0)} \quad (3.9)$$

Energetická bilance sušení

Energetická bilance sušení slouží k určení množství dodaného tepla sušícímu médiu a k určení energetické náročnosti sušení.

Teoretické množství tepla potřebné pro sušení

Teoretické množství tepla potřebného pro sušení je součtem tepla potřebného na ohřev sušiny a obsahu vody v materiálu na teplotu mokrého teploměru při konvektivním sušení a teplo potřebného k vypaření vody, která má být z materiálu odstraněna. [4]

$$Q_{teoretické} = Q_{suš\ ohřev} + Q_{w\ ohřev} + Q_{výparné} \quad (3.10)$$

$$Q_{suš\ ohřev} = m_{suš} \cdot c_{psuš} \cdot \Delta T_{ohřev} \quad (3.11)$$

$$Q_{w\ ohřev} = m_w \cdot c_{pw} \cdot \Delta T_{ohřev} \quad (3.12)$$

$$Q_{w\ ohřev} = m_w \cdot c_{pw} \cdot \Delta T_{ohřev} \quad (3.13)$$

$$Q_{w\ výparné} = \Delta m_w \cdot l_{výparné} \quad (3.14)$$

Reálné množství tepla potřebné pro sušení

Skutečná náročnost sušení bude větší o ztráty např. tepelné ztráty do okolí a citelné teplo odcházející v sušícím médiu.

$$Q_{skutečné} = Q_{teoretické} + Q_{ztráty} \quad (3.15)$$

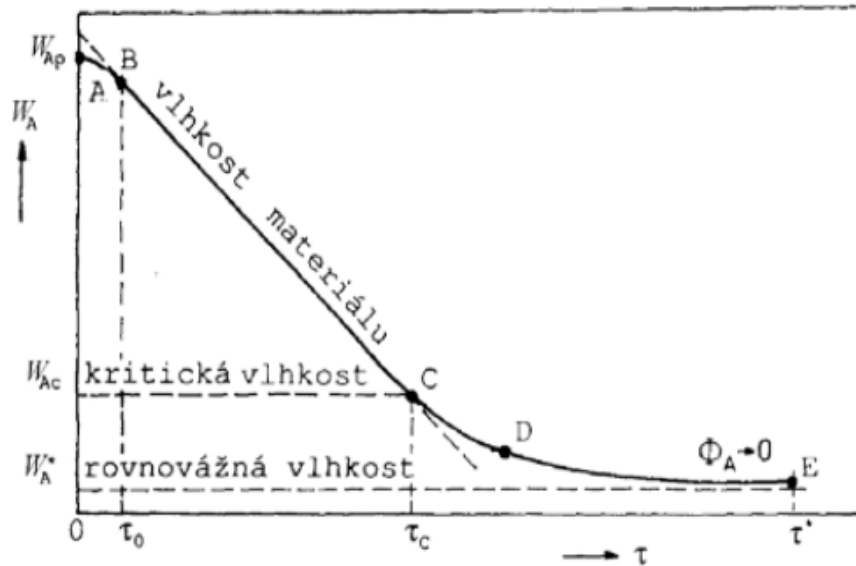
Statika sušení slouží k určení hmotnostního toku sušícího vzduchu. Vychází ze známých parametrů jako jsou teplota a relativní vlhkost sušícího vzduchu, vstupní vlhkost sušeného materiálu a požadované koncové vlhkosti materiálu. [4]

3.3 Kinetika sušení

Kinetika sušení vyjadřuje závislost rychlosti sušení na čase neboli množství vody odsušené z jednotky hmoty materiálu za jednotku času. Slouží k určení doby setrvání v sušárně a k určení velikosti sušárny pro dosažení požadovaných parametrů na konci sušení (obsah vody v materiálu na výstupu). Teoretický výpočet je velmi složitý, dochází současně k sdílení tepla i hmoty, a proto se využívá zkušeností z provozu již stávajících zařízení. [4], [6], [8]

Průběh sušení závisí na mnoha parametrech. Značný vliv na něj má přívod tepla prostřednictvím sušícího média a odvod vzniklé vodní páry, což lze ovlivnit správnou konstrukcí sušícího zařízení. Dalším důležitým faktorem pro sušení jsou samotné vlastnosti sušeného materiálu, charakter vazby vlhkosti na materiál a pohyb vlhkosti uvnitř materiálu např. porozita, kterou nelze téměř ovlivnit. [6]

Průběh sušení lze znázornit graficky jako závislost obsahu vody na době sušení. Na obrázku 7 je tato závislost znázorněna a nazývá se sušicí křivkou. Je zřejmé, že obsah vlhkosti neklesá lineárně. Na začátku sušení je nejprve nutné materiál ohřát na teplotu sytosti vody a až poté může probíhat odpařování vody. V první fázi sušení je úbytek vlhkosti z povrchu materiálu poměrně rychlý a rychlost sušení stoupá. Poté sušení přechází do úseku, kdy je úbytek vlhkosti přímo úměrný době sušení. Nakonec rychlost sušení dosáhne kritického bodu, za nímž rychlost prudce klesá. V této fázi dochází k odstraňování vody vnitřně vázané (kapilárně a adsorpčně vázaná voda) uvnitř materiálu silnými silami, které vyžadují velkou energii pro přesun molekul vody na povrch materiálu. Nakonec se obsah vlhkosti nachází v rovnovážném stavu, kdy je parciální tlak vodních par nad sušeným materiálem stejný jako parciální tlak par v sušícím médiu. Sušicí křivka spolu s měrnou plošnou odpařivostí a měrnou objemovou odpařivostí slouží jako hlavní sušicí charakteristiky využívané pro návrh a dimenzování sušáren. [6]



Obrázek 7: Sušící křivka [9]

Měrná plošná odpařivost o_S [$kg_w/hod \cdot m^2$]

Měrná plošná odpařivost je množství vody odpařené z $1 m^2$ otápeného povrchu sušárny za jednu hodinu sušení. [4]

Měrná objemová odpařivost o_V [$kg_w/hod \cdot m^3$]

Měrná objemová odpařivost je množství vody odpařené z $1 m^3$ objemu materiálu za jednu hodinu sušení. [4]

3.4 Faktory ovlivňující rychlost sušení

Rychlost sušení zásadně ovlivňuje dobu sušení, která je nejdůležitějším parametrem pro návrh a výpočet sušárny. Z ekonomických důvodů je většinou sušárna navržena tak, aby byla doba sušení co nejkratší. Určení doby sušení pomocí empirických rovnic je složité a často nepřesné.

Na dobu sušení mají vliv následující parametry:

- vlastnosti sušeného materiálu – jeho struktura, pórovitost a vazba vlhkosti ve struktuře materiálu,
- tvarová homogenita sušeného materiálu, jeho rozměry a celková tloušťka sušené vrstvy,
- počáteční a konečná vlhkost sušeného materiálu,
- teplota a relativní obsah vlhkosti v sušicím médiu,
- volba sušicího média,

- požadavky na rovnoměrnost sušení,
- volba konstrukce sušárny.

3.4.1 Vliv teploty sušicího média

Jak již bylo zmíněno na začátku, zvýšená teplota sušicího média vede ke zrychlení procesu sušení. Současně s tím dochází ke zvýšení tepelných ztrát, které jsou nejvýznamnější na konci sušení, kdy je obsah vlhkosti v materiálu nízký. Nejvyšší vhodná teplota sušicího média závisí na způsobu sušení a na druhu sušeného materiálu.

Při sušení materiálu ve fluidní vrstvě probíhá stále míchaní materiálu a nedochází k místním přehřátím. Maximální teplota sušicího média může dosahovat až 180 °C. [6]

3.4.2 Vliv rychlosti sušicího média

Vliv rychlosti sušicího média na rychlost sušení lze pozorovat jen na úseku konstantní rychlosti sušení. Čím vyšší je rychlost sušicího vzduchu, tím vyšší je rychlost sušení. Zvýšení rychlosti sušicího vzduchu nad 5 m/s nemá žádný vliv na rychlost sušení, protože proud vzduchu se nad tuto rychlostí začne odtrhávat od sušeného materiálu. V koncové fázi sušení rychlost proudění vzduchu výrazně neovlivňuje rychlost sušení, a proto by v tomto úseku neměla být vyšší jak 1 m/s. [6]

3.4.3 Vliv rozdělení materiálu v sušárně

Způsob rozdělení a tloušťka vrstvy materiálu v sušárně má zásadní vliv na dobu sušení. [6]

3.5 Sušárny

Sušárny jsou zařízení, v nichž se vlhký materiál zbavuje obsahu vody pomocí přívodu tepla v sušicím médiu, které zároveň slouží k odvodu vzniklých vodních par do okolí. Dělení sušáren je možné podle nejrůznějších kritérií:

1. Podle režimu provozu:
 - nepřetržitě pracující sušárny (diskontinuální),
 - nepřetržitě pracující sušárny (kontinuální).
2. Podle provozního tlaku:
 - atmosférické,
 - vakuové,

- přetlakové.

3. Podle způsobu přívodu tepla:

- Konvektivní sušení

Teplo je do sušárny zaváděno pomocí sušicího média, kterým mohou být např. spaliny, vzduch, pára nebo inertní plyny. Sušicí médium prochází vrstvou sušeného materiálu a dochází k odvodu odpařené vlhkosti z prostoru sušárny.

- Konduktivní sušení

Teplo se přivádí sušené látce kondukcí z ploch sušárny přes výhřevnou plochu, ty jsou se sušeným materiálem v přímém styku. Výhřevná plocha bývá nejčastěji otápěna parou nebo horkou vodou.

- Sušení pomocí radiace

Teplo přivádíme k sušené látce sáláním (radiací).

- Vysokofrekvenční

Tepelná energie se transformuje z elektrické energie uvnitř sušeného materiálu.

- Akustické (ultrazvukové)

Tepelná energie vzniká v důsledku ultrazvukového kmitání.

- Kombinované

Tepelná energie se do sušárny dodává kombinací výše uvedených.

4. Podle posuvu materiálu:

- Přirozený

Do této kategorie patří roštové sušárny, kdy materiál zůstává v pevné vrstvě na roštu anebo sušárny, kdy je materiál uveden do vznosu nebo úletu působením dynamických účinků sušicího média např. proudové a fluidní sušárny.

- Nucený

Zde lze sušárny dále rozdělit do dvou kategorií. Sušený materiál je buď posouván pomocí dopravního zařízení např. řetězová sušárna, pásová sušárna, bubnová sušárna nebo se materiál převrací a otáčí. Do této kategorie patří např. vibrační sušárna nebo šneková sušárna.

5. Podle druhu sušicího média:

- Horkovzduch

K sušení se využívá okolní vzduch, který je nutné ohřát.

- Spaliny

K sušení se využívá spalín, což může být ekonomicky výhodné, protože se využívá odpadní teplo, ale hrozí riziko poškození sušeného materiálu.

- Inertní plyny

K sušení se používají plyny s velmi nízkou chemickou reaktivitou např. He, Ar, Xe.

- Přehřátá pára

6. Podle cirkulace sušicího média:

- s přirozenou cirkulací,
- s nucenou cirkulací.

7. Podle použití cirkulace sušicího média:

- s recirkulací – sušicí médium se po průchodu sušárnou, znovu použije k sušení.
- bez recirkulace – sušicí médium prochází suškou pouze jednou a není dále využíváno.

8. Podle ohřevu sušicího média:

- elektřinou,
- spálením paliva,
- sluncem,
- přehřátou parou.

9. Podle konstrukce:

- bubnové,
- válcové,
- tunelové,
- šachtové,
- pásové,
- komorové.

10. Podle směru pohybu sušicího média a sušeného materiálu:

- polopohyblivé – pohybuje se pouze buď sušený materiál nebo sušicí médium,
- souproude – pohyb sušeného materiálu a sušicího vzduchu směřuje stejným směrem,
- protiproude – pohyby sušeného materiálu a sušicího vzduchu směřují proti sobě,
- s křížovým proudem – směr pohybu sušeného materiálu je kolmý na směr sušicího média.

11. Podle druhu sušeného materiálu

- pro tekuté materiály,

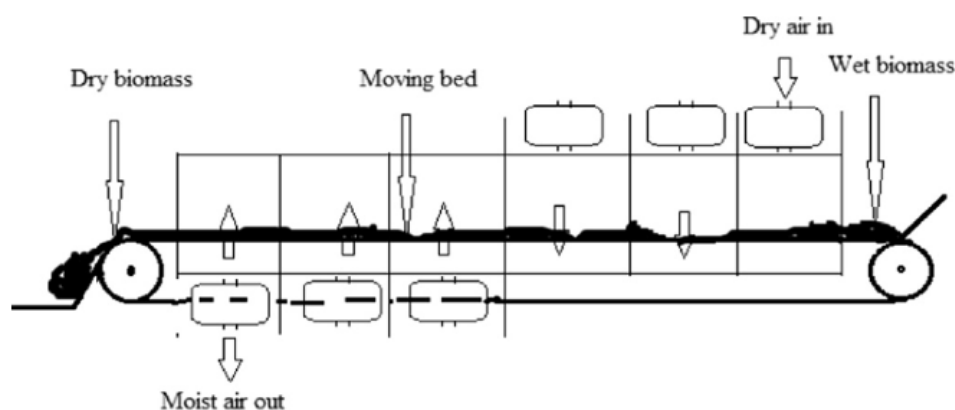
- pro pastovité materiály,
- pro tuhé materiály.

3.5.1 Druhy sušáren vhodné pro biomasu

Z předchozího rozdělení uvedeného v kapitole 3.5. je zřejmé, že existuje obrovské množství sušáren pro nejrůznější druhy materiálů. Následující kapitola se věnuje popsání principu fungování vybraných druhů sušáren.

3.5.2 Pásová sušárna (sušárna s pohyblivým ložem) profukovaná

Pásová sušárna zobrazena na obrázku 8 se řadí mezi sušárny s konvektivním způsobem sušení. Používá se především díky své jednoduché konstrukci, nízkým investičním nákladům, vysoké účinnosti sušení, možnosti rekuperace tepla a nízkým nákladům na údržbu. Vlhká biomasa je přiváděna na pravém konci, ideálně aby tvořila rovnoměrnou, ne příliš tlustou vrstvu, dále putuje po pohyblivém perforovaném loži na druhý konec, kde je vysušena a odchází z prostoru sušárny. Sušící médium vstupuje nad pohyblivými pásy, poté putuje před vrstvu mokrého materiálu, přes perforovaný pás a vystupuje v horním prostoru sušárny. Energetická účinnost těchto typů sušáren je obecně nízká, ale lze ji zvýšit pomocí recirkulace sušícího média. Sušárna s pohyblivým ložem představuje efektivní využití nízkopotenciálního tepla (odpadního tepla), které je běžně dostupné ve zpracovatelských závodech. Výhodou tohoto typu sušárny je kontinuální provoz a dlouhá doba sušení. [10]

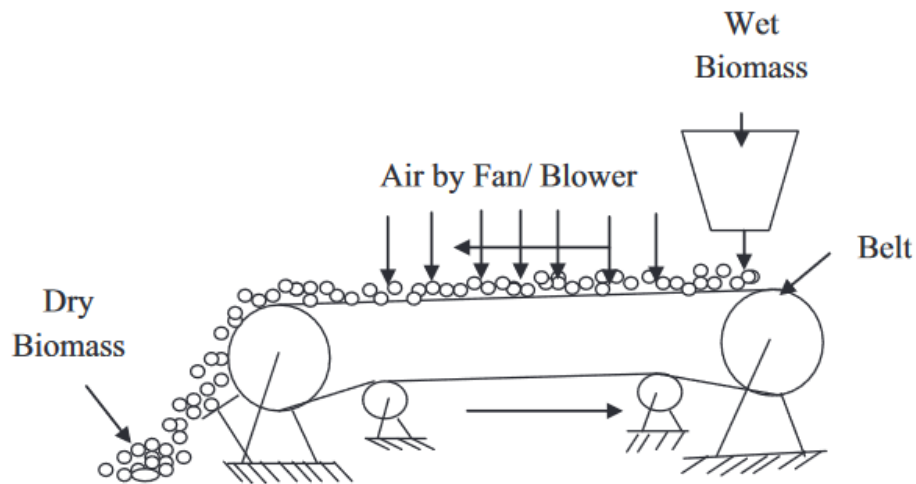


Obrázek 8: Pásová sušárna [10]

3.5.3 Pásová sušárna ofukovaná

Jedná se o konvektivní sušárnu pracující v kontinuálním režimu. Materiál se rozprostře na pohyblivý dopravník. Ventilátory, umístěné nad dopravníkem ofukují vrstvy materiálu

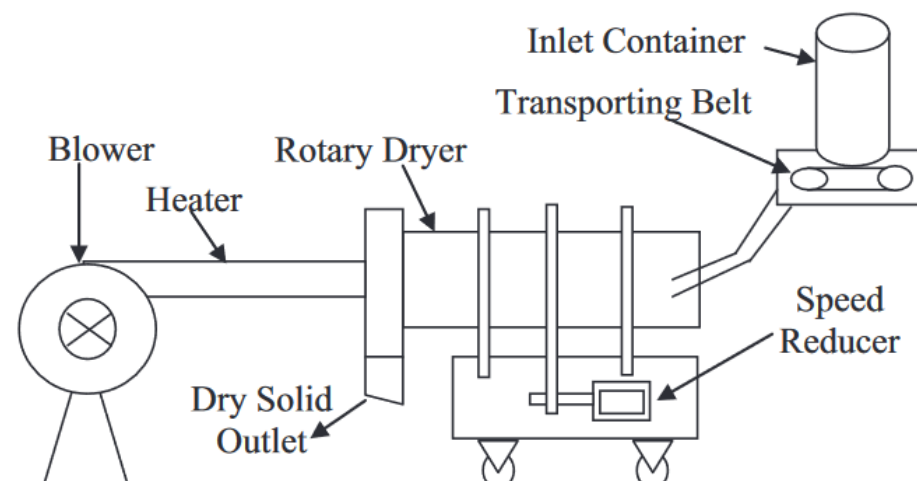
sušicím médiem. Tento typ sušáren je vhodný pro využití odpadního nebo nízkopotenciálního tepla, díky nízké potřebě provozní teploty, která snižuje riziko vzniku požáru. [10]



Obrázek 9: Ofukovaná pásová sušárna [10]

3.5.4 Bubnová rotační suška

Na obrázku 10 je zobrazeno schéma bubnové rotační sušárny, která se skládá z velkého rotujícího bubnu, který je mírně nakloněn směrem k výstupu materiálu. Mokrý materiál se přivádí na horní konec bubnu, pohybuje se podél bubnu a suší se. Vysušený materiál opouští prostor sušárny v dolní části bubnu. Sušící médium proudí proti směru pohybu materiálu. Uvnitř bubnu se mohou nacházet nejrůznější vestavby, sloužící k tomu, aby se materiál nenahromadil u dna sušárny a putoval ve směru rotace po obvodu bubnu. Následný pád materiálu zpět na dno má za následek intenzivní přestup tepla a hmoty mezi materiálem a sušicím médiem. Různé druhy vestaveb jsou zobrazeny na obrázku 11. U tohoto druhu sušárny lze místo konvektivního ohřevu použít i konduktivní ohřev. K samotnému sušení dochází kontaktem sušeného materiálu s teplosměnnou plochou na vnitřním průměru bubnu nebo trubkami vedenými uvnitř bubnu, v nichž by proudila topná pára. Zmíněné způsoby ohřevu lze kombinovat. Rotační sušárny jsou díky své jednoduchosti používány v mnoha průmyslových odvětvích pro sušení pevných částic. [10]



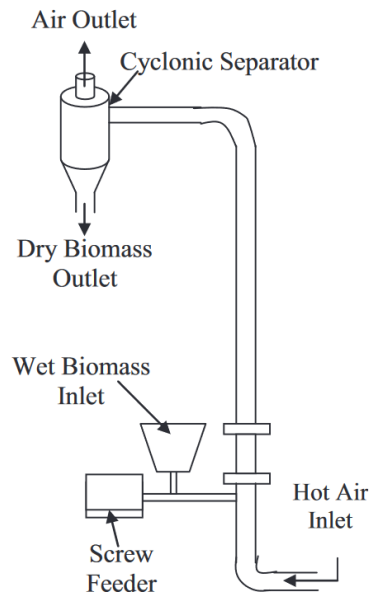
Obrázek 10: Bubnová sušárna [10]



Obrázek 11: Vestavby používané v bubnových sušárnách [11]

3.5.5 Proudová a „flash“ sušárna

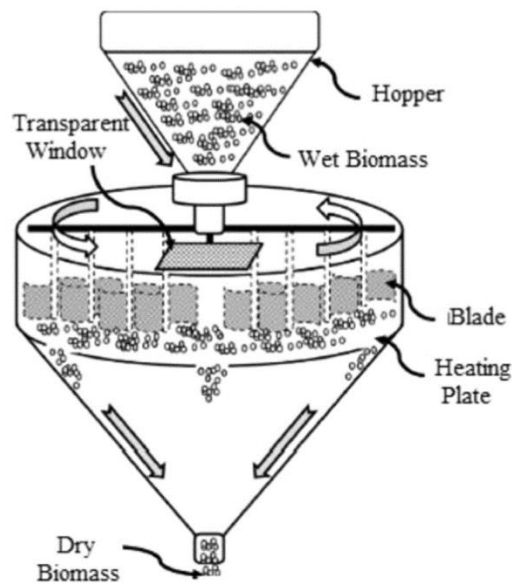
V proudové sušárně se sušený materiál mísí s rychle proudícím sušicím médiem. Dochází k rychlému sušení s krátkou dobou setrvání materiálu v sušárně okolo 10–30 s. Jedná se o kontinuální konvektivní sušárnu. Tento druh sušárny je znázorněn na obrázku 12. Použití těchto sušáren je vhodné pouze pro materiály s malým rozměrem částic. Větší kusy materiálu není schopno sušicí médium uvést do pneumatického transportu, a tak propadávají do mlýna, kde jsou následně rozemlety. Jako sušicí médium se často používá přehřátá pára, která se přivádí zesponu a plní zároveň i přepravní funkci. Částice materiálu vstupují do prostoru sušárny ze strany a jsou dopravovány sušicím médiem nahoru. Vysušené částice se na konci sušárny oddělí v cyklonu od sušicího média, které se dále recirkuluje. V případě, že nedochází k dokonalému odloučení částic od sušicího média v cyklonu, je za ním zařazen ještě filtr. Proudová sušárna dosahuje v porovnání s ostatními sušárnami nejúčinnějšího odstranění vlhkosti z materiálu, a také dobrou rovnoměrnost konečného obsahu vlhkosti v materiálu. Sušárna může být provozována buď v přetlaku nebo v podtlaku, aby nedocházelo k prášení materiálu ven ze sušárny. [10]



Obrázek 12: Proudová sušárna [10]

3.5.6 Disková sušárna

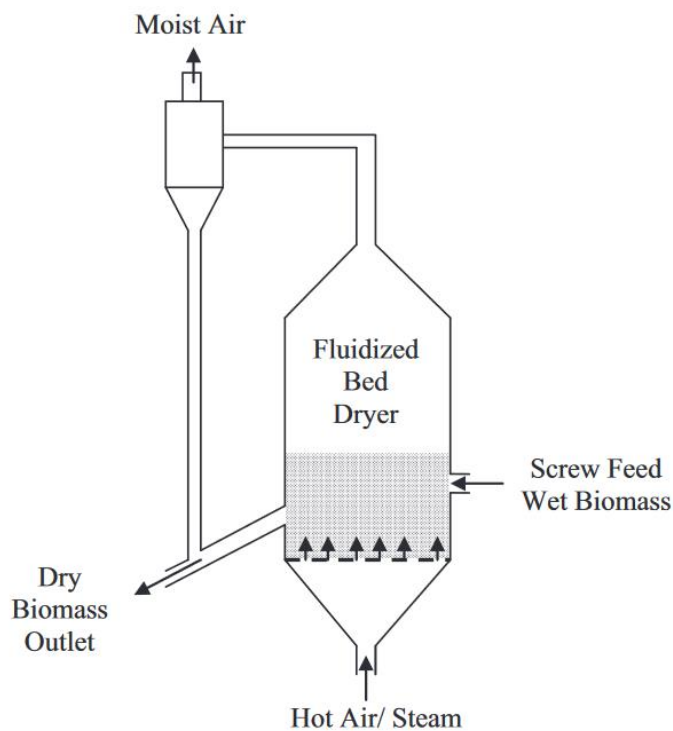
V diskové sušárně je materiál ohříván nejčastěji kondenzující parou uvnitř centrálního hřídele, na kterém je umístěno mnoho dutých disků, jak je zobrazeno na obrázku 13. Působení otáčejících se kotoučů a lopatek míchadla zajišťuje intenzivní přestup tepla. Tento typ kontinuálních sušáren je vhodný pouze pro malé hmotnostní toky materiálu. Jako sušící médium k nepřímému ohřevu může být použita sytá pára, horká voda nebo termální olej. Diskové sušičky lze provozovat v režimu s vakuem nebo v přetlaku. [10]



Obrázek 13: Disková sušárna [10]

3.5.7 Fluidní sušárna

V sušárně s fluidní vrstvou prochází sušící médium vrstvou sušeného materiálu. Průtok sušícího média musí být natolik velký, že se sušený materiál dostane do stavu vlnosy (fluidace), ale nesmí překročit mez, kdy by docházelo k úletu menších částic materiálu z vrstvy. Proto se v horní části nachází cyklon, aby pneumaticky transportované částice odseparoval od sušícího média a vrátil je zpět do fluidní vrstvy. Tento typ sušáren je velmi oblíbený, má několik výhod oproti jiným druhům sušáren např. velká kontaktní plocha mezi tuhým materiálem a sušícím médiem, vysoká intenzita míchání vrstvy, která zajišťuje minimální teplotní a koncentrační diference v objemu vrstvy. Všechny tyto faktory zajišťují intenzivní přestup tepla a hmoty a zkracují dobu sušení. [10]



Obrázek 14: Fluidní sušárna [10]

3.5.8 Porovnání vlastností sušáren

Tabulka 1: Porovnání sušáren

Sušárna	Pásová	Bubnová	Proudová	Disková	Fluidní
Rozsah teplot [°C]	80 – 150	230 – 1 100	150 – 700	20 – 170	150 – 200
Rozměr částic[mm]	–	25 – 125	0,5 – 50	–	0,1 – 2
Typ	konvektivní	konvektivní	konvektivní	kontaktní	konvektivní
Provoz	kontinuální	kontinuální	kontinuální	kontinuální	kontinuální, kampaně
Kapacita [kg/h]	až 9 000	až 7 000	až 9 000	až 5 000	až 9 000
Odpařovací výkon[kg_w/h]	10 – 100	10 – 100	40 – 300	50 – 80	až 90
Spotřeba energie [MJ/kg_w]	4 – 6	3,2 – 8	4,5 – 9	4,6 – 9	4 – 6

4 Fluidace

Fluidací se nazývá proces, kdy je pevná částice v gravitačním poli obtékána plynem nebo kapalinou ve směru proti působení gravitační síly. Na pevnou částici působí gravitační, odporové a vztlakové síly. K procesu fluidace dochází, když jsou účinky vztlakové síly na částici větší než gravitační. Přičemž gravitační a vztlaková síla jsou závislé na hmotnosti částice a na vlastnostech používaného média. Pouze odporová síla je závislá na rychlosti obtékaného média (se zvyšující se rychlostí roste). Při určité rychlosti dojde k silové rovnováze. Tento stav se nazývá prahová nebo minimální rychlost fluidace u_{mf} . Pokud tohoto stavu dosáhne celý soubor částic, vznikne fluidní vrstvu o výšce H_0 . Se zvyšující se rychlostí se zvyšuje i tlaková ztráta fluidní vrstvy. Jednotlivé částice vrstvy přestávají být ve vzájemném kontaktu. Objem fluidní vrstvy se při dosažení prahové rychlosti fluidace zvětší oproti nehybné vrstvě, a proto říkáme, že vrstva expandovala na výšku H_E . Při dalším zvyšování průtoků, se budou vzdálenosti mezi částicemi zvětšovat, tudíž se bude zvětšovat i expanze vrstvy, a nakonec dojde k úletu částic. Tato rychlost se nazývá prahovou rychlostí úletu u_t , při které se částice začnou pneumaticky transportovat z vrstvy. [12], [13]

Základní vlastnosti fluidní vrstvy:

- velká pohyblivost částic,
- rovnoměrné rozložení teploty,
- celý povrch částic je ve styku s proudícím médiem,
- mechanismy sdílení tepla a hmoty jsou intenzivnější ve srovnání s nehybnou vrstvou,
- fluidní vrstva má některé charakteristické vlastnosti jako kapalina.

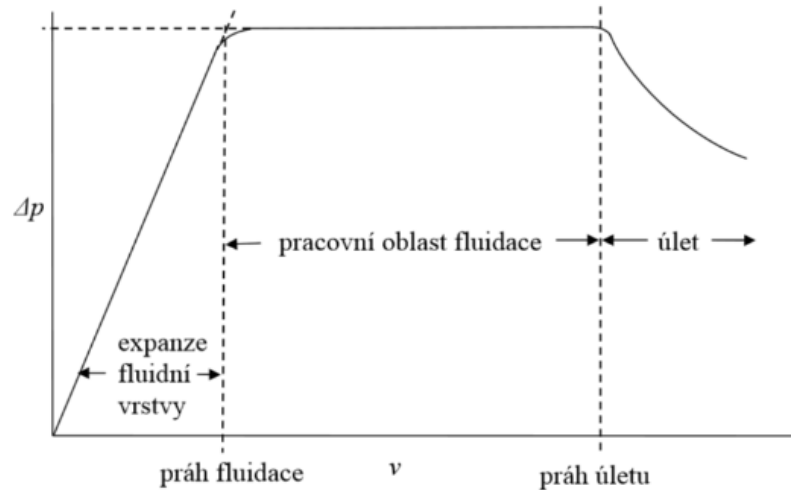
4.1 Tlaková ztráta fluidní vrstvy

Tlaková ztráta fluidní vrstvy Δp nabývá své maximální hodnoty při dosažení prahové rychlosti fluidace. Ta se při dalším zvyšování rychlosti příliš nemění, až do prahové rychlosti úletu, kdy prudce klesá. Závislost rychlosti proudění a tlakové ztráty můžeme vidět na obrázku 15. Tato závislost poskytuje užitečné informace o chování fluidní vrstvy a lze ji dobře vyjádřit pomocí Ergunova vztahu. Tlakovou ztrátu fixní vrstvy lze vyjádřit pomocí následující rovnice.

$$\Delta p = \frac{150 \cdot H \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot \mu}{\varepsilon^2 \cdot \Phi^2 \cdot d_{stř}^2} \cdot u + \frac{1,75 \cdot H \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \rho_g}{\varepsilon^3 \cdot \Phi \cdot d_{stř}} \cdot u^2 \quad (4.1)$$

Po dosažení prahové rychlosti fluidace se tlaková ztráta rovná hmotnosti fluidní vrstvy a nezávisí na rychlosti proudění a platí pro ni vztah. [12]

$$\Delta p = (1 - \varepsilon) \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot g \cdot H \quad (4.2)$$



Obrázek 15: Závislost tlakové ztráty fluidní vrstvy na rychlosti proudění [14]

4.2 Výpočet prahové rychlosti fluidace

K výpočtu prahové rychlosti fluidace lze použít řadu teoretických a empirických vztahů. Mnoho z nich má omezenou platnost Reynoldsova čísla Re a Archimedova čísla Ar či středního průměru částic D . Jedním z nejpoužívanějších vztahů, který nemá žádné omezující podmínky platnosti a poskytuje odpovídající hodnoty, vychází z Erguanovy rovnice.

$$\frac{1,75}{\varepsilon^3 \cdot \Phi} \cdot \left(\frac{d_{stř} \cdot u \cdot \rho_g}{\mu} \right)^2 + \frac{150 \cdot (1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3 \cdot \Phi^2} \cdot \left(\frac{d_{stř} \cdot u \cdot \rho_g}{\mu} \right) = \frac{d_{stř}^3 \cdot \rho_g \cdot (\rho_s - \rho_g)}{\mu^2} \quad (4.3)$$

Tento vztah lze upravit pomocí podobnostních čísel.

$$\frac{1,75}{\varepsilon \cdot \Phi} \cdot Re^2 + \frac{150 \cdot (1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3 \cdot \Phi^2} \cdot Re = Ar \quad (4.4)$$

kde Re je Reynoldsovo číslo a Ar je Archimedovo číslo

$$Re = \frac{d_{stř} \cdot u \cdot \rho_g}{\mu} \quad (4.5)$$

$$Ar = \frac{d_{stř}^3 \cdot \rho_g \cdot (\rho_s - \rho_g)}{\mu^2} \quad (4.6)$$

kde sféricita částic Φ je definována jako poměr povrchu koule a povrchu částice stejného objemu. Bude nabývat hodnot 0 až 1. Přičemž 1 odpovídá kulovým částicím.

Mezerovitost ε je definována jako část objemu vrstvy připadající na prázdný prostor. Jedná se o poměr volného objemu ve fluidní vrstvě a celkového objemu vrstvy. [13], [15]

4.3 Typy fluidních vrstev

Na obrázku 16 jsou zobrazeny různé typy fluidních vrstev:

a) Pevná (fixní vrstva)

Rychlost fluidačního média je nízká a médium prochází mezi stacionárními částicemi vrstvy. Částice se nedostávají do vznosu, k fluidaci nedochází.

b) Vrstva s minimální fluidací

Fluidační médium dosahuje vyšší rychlosti než v případě (a) a ta odpovídá prahové rychlosti fluidace a vrstva částic se dostává do stavu vznosu. Dochází k relativnímu pohybu částic. Vrstva začíná fluidovat a mírně expanduje.

c) Hladká fluidní vrstva

Pro případ, kdy je fluidačním médiem kapalina je charakteristické hladké, stabilní a plynulé rozšiřování vrstvy po překročení prahové rychlosti fluidace a následném zvyšování rychlosti. Vlastnosti této vrstvy jsou naprosto ideální, ale velmi těžko dosažitelné.

d) Bublinkující fluidní vrstva

S případy, kdy je fluidačním médiem plyn s hladkou a stabilní vrstvou se lze setkat pouze výjimečně, ve speciálních případech. Se zvyšující se rychlostí vznikají velké nestability, které se projevují vznikem bublin tvořených fluidačním médiem. Probublávání vrstvy má pozitivní vliv na mísení a promíchávání částic ve fluidní vrstvě.

e) Vrstva s axiálními pístkami

Vrstvu s axiálními nebo plochými pístkami lze obvykle pozorovat u zařízení s velkou výškou a k tomu poměrně malým průměrem. Dochází k tomu v případě, že se bublinky, které vznikají ve spodní vrstvě fluidní vrstvy spojí do jedné větší a ta nerovnoměrně nadnáší velké množství částic. Tato vrstva je typická pro částice s malým středním

průměrem a projevuje se bublinami stoupajícími středem zařízení, přičemž se významné množství částic shlukuje u stěn, a to nepříznivě ovlivňuje vlastnosti fluidní vrstvy.

f) Vrstva a plochými písky

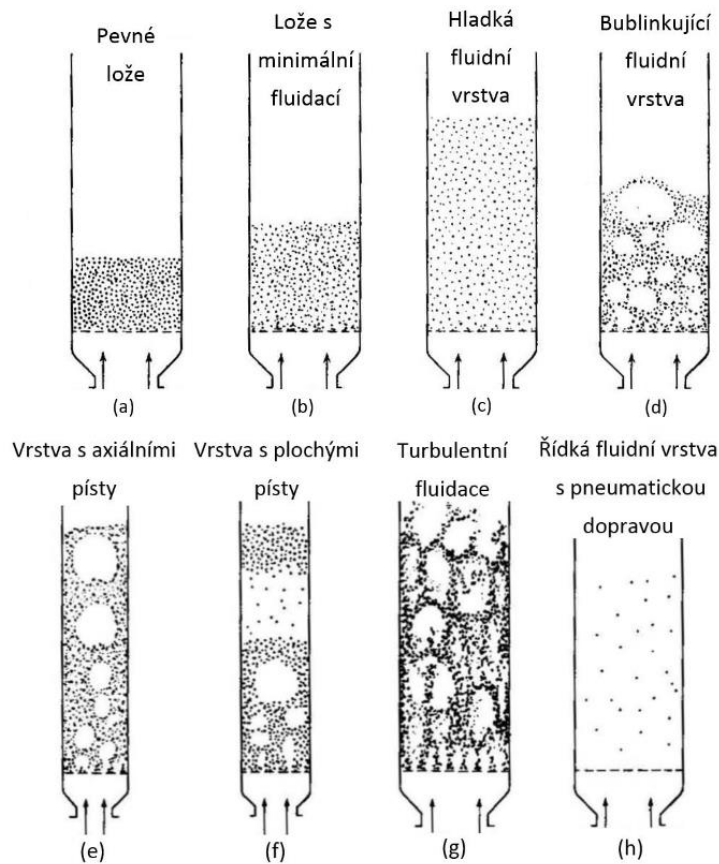
Tento typ vrstvy je typický spíše pro větší částice, kdy vzniklá bublina obvykle pokryje celý průřez fluidní vrstvy, a tím se vytvoří pístek, který nadnáší velké množství částic. Když bublina dorazí do horní části zařízení, dojde ke ztrátě stability pístku a částice spadnou zpět na dno. To má obvykle za následek nežádoucí rázy a vibrace.

g) Turbulentní fluidní vrstva

Při dalším zvýšení rychlosti proudění dochází k tvorbě shluků částic, různých velikostí a tvarů a k jejich následnému turbulentnímu pohybu ve fluidní vrstvě. U některých lehčích částic je dosaženo prahové rychlosti úletu a dochází k jejich pneumatickému transportu pryč z vrstvy.

h) Vrstva s pneumatickým transportem

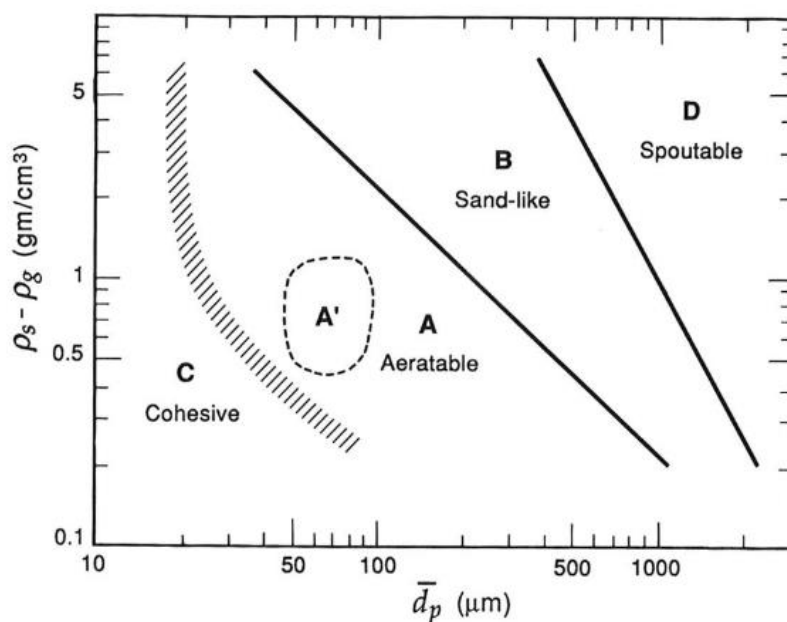
V tomto typu vrstvy je rychlost proudění vyšší než prahová rychlost úletu a u všech částic dochází k jejich pneumatickému transportu z vrstvy. [14]



Obrázek 16: Typy fluidních vrstev [15]

4.4 Geldartova klasifikace částic

Geldartova klasifikace částic rozděluje materiály do čtyř různých skupin na základě pozorování jejich chování ve fluidní vrstvě. Chování fluidní vrstvy je výrazně ovlivněno typem, velikostí a tvarem částic materiálu. Materiály jsou rozděleny do čtyř skupin, díky kterým lze predikovat chování fluidní vrstvy, na základě rozdílu hustot částic materiálu a fluidačního média a středním průměru částic.



Obrázek 17: Geldartův diagram [15]

Skupina C

Do skupiny C patří částice s nejmenším středním průměrem, soudržné, velmi jemné a práškové materiály. Dosažení stavu fluidace je pro ně extrémně náročné. Je to způsobeno působením kohezních sil mezi jednotlivými částicemi, které jsou větší než síly vzniklé působením fluidačního média. V reaktorech s malým průměrem mají částice tendenci tvořit zátku, která postupně stoupá reaktorem. V reaktorech s větším průměrem tyto částice pouze usměrní tok fluidačního média a nedochází ke fluidaci materiálu. Patří sem materiály např. mouka, škrob, pudr. [15]

Skupina A

Do této skupiny patří materiály s malým středním průměrem částic s malou hustotou do 1400 kg/m^3 . Částice jsou přivedeny do stavu fluidace již při malých rychlostech fluidačního

média a tvoří plynulou fluidní vrstvu. Při vyšších rychlostech fluidačního média tvoří částice stacionární fluidní vrstvu s malými bublinkami. [15]

Skupina B

Skupinu B charakterizují materiály podobné písku. Stacionární bublinkující fluidní vrstvu tvoří téměř okamžitě po dosažení prahové rychlosti fluidace. Při zvyšování rychlosti fluidačního média se u vstupu plynu začnou tvořit malé bublinky, které se při pohybu vzhůru reaktorem téměř lineárně zvětšují a spojují se s ostatními bublinkami, což má za následek cirkulaci látek ve vrstvě. Velikost vznikajících bublin příliš nezávisí na střední velikosti částic materiálu. [15]

Skupina D

Do této skupiny patří materiály s velkou hustotou anebo rozměrově velké částice. V silných vrstvách dochází k fluidaci jen velmi obtížně. Pokud ke vznosu vůbec dojde, vrstva materiálu se chová chaoticky. Ve vrstvě se tvoří velké explodující bublinky, dochází k tvorbě kanálků a toku plynu mezi částicemi materiálu. [15]

5 Fluidní sušení

Fluidní sušení je speciální případ horkovzdušného sušení, ke kterému dochází při vyšších hodnotách rychlosti proudění sušicího média. Sušení ve fluidní sušárně je založeno na principu profukování sušicího média vrstvou sušeného materiálu rychlostí proudění, při níž dochází k vzájemnému pohybu jednotlivých částic sušeného materiálu. Tento princip se používá zejména pro jemně až středně zrnité materiály. Existuje nepřeberné množství konfigurací a uspořádání fluidních sušáren, které jsou určeny především schopností různých materiálů tvořit fluidní vrstvy. Na obrázku 18 je zobrazena fluidní sušárna s klasickou konfigurací. Lze použít sušárny se složitější konfigurací např. sušárny s přídatným zařízením, pomocí kterého lze dosáhnout intenzivnějšího promíchávání a tím zkrácení doby sušení např. fluidní sušárny s pulzujícím ložem, s vibračním fluidním ložem nebo s mechanickým promícháváním. [8], [16]

Fluidní sušení probíhá ve fluidní vrstvě, která vznikne přívodem fluidního a sušicího média současně. Tímto médiem mohou být spaliny nebo vzduch ohřátý v kaloriferu (ohřívák vzduchu), které jsou rovnoměrně rozváděny po celém příčném průřezu fluidní sušárny pomocí fluidního distributoru. Mezi hlavní výhody fluidního sušení patří vysoká intenzita přenosu tepla a hmoty mezi sušicím médiem a sušenými částicemi. V porovnání s ostatními druhy sušení je doba sušení velmi krátká. Intenzivní promíchávání vrstvy má za následek rovnoměrné rozložení teploty i koncentraci částic, což usnadňuje regulaci provozu sušárny. Nevýhodou fluidních sušáren je cena zařízení, opotřebení zařízení abrazi, náchylnost ke korozi a vysoké požadavky na tvar, velikost a homogenitu částic sušeného materiálu. Další nevýhodou při sušení v kontinuálních fluidních sušárnách bývá nesteromerná doba setrvání sušených částic materiálu v sušárně. Proto kvalita produktu nebývá stejnoměrná a stupeň vysušení je obvykle nižší. [16]

5.1 Kinetika fluidního sušení

Tepelný výkon předaný ve fluidní sušárně mezi sušicím médiem a sušeným materiálem lze určit pomocí tepelné bilance výměníku tepla. V této rovnici vystupuje celková plocha všech sušených částic ve fluidní vrstvě, které jsou obtékány sušicím médiem. Logaritmický teplotní spád se určí pomocí protiproudého řazení tepelného výměníku mezi sušicím médiem a sušeným materiálem. Určení součinitele přestupu tepla je velmi obtížné a jeho hodnota se mění v průběhu sušení, proto bývá často určena experimentálně. Pro zjednodušení v energetických

aplikacích lze uvažovat, že sušení probíhá pouze v I. fázi sušení, pak bude součinitel přestupu tepla konstantní. Kriteriaální rovnice pro určení součinitele přestupu tepla je možné převzít z odborné literatury, kde také často vystupuje tzv. objemový součinitel přestupu tepla. Pak v rovnici tepla předaného ve fluidní vrstvě bude místo celkové plochy sušených částic vystupovat objem fluidní vrstvy. [12]

$$Q_{suš} = \alpha \cdot S_{mat} \cdot \Delta T_{ln} \quad (5.1)$$

$$Q_{suš} = \alpha_V \cdot V_{mat} \cdot \Delta T_{ln} \quad (5.2)$$

Zde jsou uvedeny vybrané kriteriaální rovnice z literatury pro výpočet Nusletova čísla při fluidním sušení pro vybrané rozmezí Reynoldsova čísla. [17]

Pro rozsah $0 < Re < 100$

$$Nu = 2 + 0,6 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33} \quad (5.3)$$

Pro rozsah $100 < Re < 10\,000$

$$Nu = 1,01 \cdot Re^{0,48} \cdot Pr^{0,33} \quad (5.4)$$

kde

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda} \quad (5.5)$$

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_{stř}}{\lambda} \quad (5.6)$$

Součinitel přestupu tepla lze získat také pomocí měrné objemové odpařivosti, jejíž hodnotu lze pro fluidní sušárny získat v literatuře a pohybuje se v rozmezí $5 - 100 \text{ kg}_w/\text{m}^3 \cdot \text{hod}$. Jestliže je známé teplo potřebné k sušení a množství odpařené vody, lze vypočítat součinitel přestupu tepla z následující rovnice. [15]

$$\alpha = \frac{Q_{suš} \cdot V_{mat} \cdot \rho_V}{\dot{m}_{\Delta w} \cdot S_{mat} \cdot \Delta T_{ln}} \quad (5.7)$$

Typy fluidních sušáren

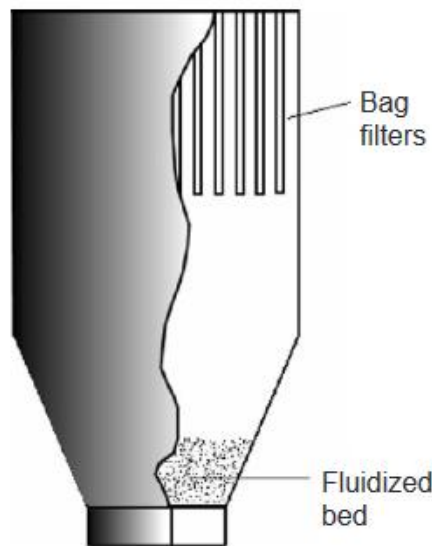
Fluidní sušárny lze rozdělit následovně:

1. Podle provozu sušárny
 - dávkové,
 - semikontinuální,
 - kontinuální.
2. Dle použití přídatného zařízení
 - bez přídatného zařízení,
 - s pulzujícím ložem,
 - s vibračním ložem,
 - s ponornými nepřímými otápenými výměníky,
 - s mechanickým promícháváním.
3. Dle sušicího a fluidačního média
 - vzduch,
 - spaliny,
 - přehřátá pára,
 - odvlhčený studený vzduch.
4. Typ fluidní vrstvy
 - s materiály schopné fluidace,
 - s inertními částicemi.

5.2 Vybrané typy fluidních sušáren

5.2.1 Dávkové sušárny

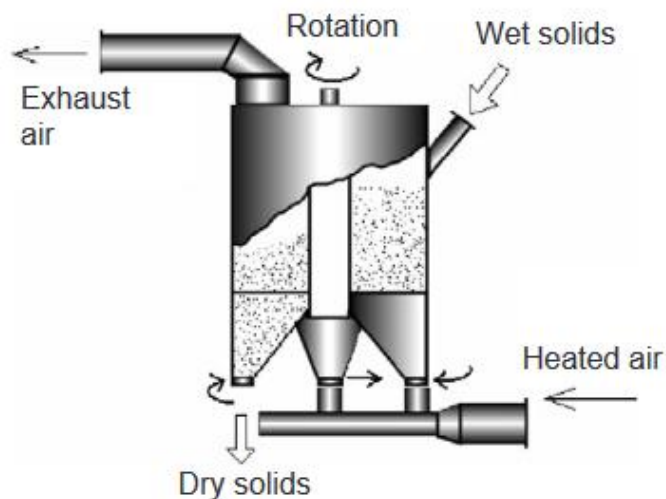
Dávkové neboli vsádkové sušárny se používají při nízkých kapacitách materiálu (50 až 1000 kg/h). Tento způsob sušení je vhodný pro postupně na sebe navazující procesy ve stejné nádobě např. míchání, sušení, granulace a chlazení. Teplota a průtok sušicího média bývá obvykle konstantní, ale regulací rychlosti a teploty lze dosáhnout úspory energie a snížit opotřebení sušárny. Použití přídatného zařízení do procesu jako např. vibrační nebo pulzující lože se používá pro obtížně fluidovatelné materiály. [8]



Obrázek 18: Dávková fluidní sušárna [8]

5.2.2 Semikontinuální sušárna

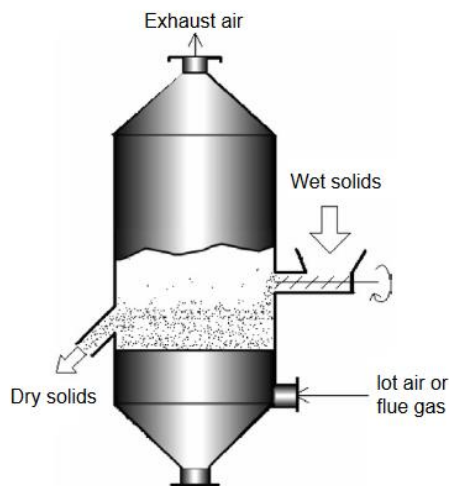
V semikontinuální fluidní sušárně se sušicí komora skládá z řady dalších součástí. Mokrý materiál vstupuje do vsádek, tyto vsádky postupují jednotlivými procesy sušení. Tento typ sušení zajišťuje plynulý a nepřetržitý provoz sušárny. Na obrázku 19 je znázorněno schéma semikontinuální fluidní sušárny, kde se vsádky otáčejí kolem osy sušárny. Teplota a průtok sušicího média lze měnit pro jednotlivé vsádky. [8]



Obrázek 19: Semikontinuální fluidní sušárna [8]

5.3 Kontinuální sušárna

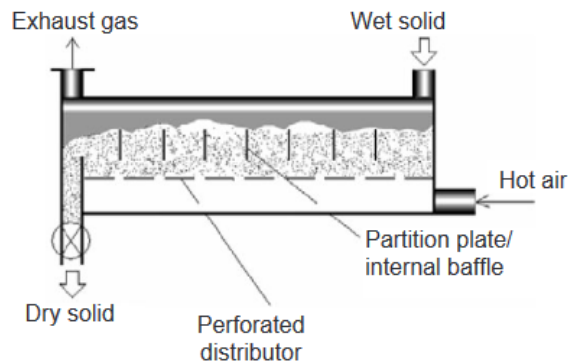
Kontinuální fluidní sušárna je jedna z nejpoužívanějších fluidních sušáren v průmyslu. Fluidní vrstva je dokonale promíchávána a má konstantní teplotu v celém svém objemu. Mezi hlavní nevýhody této konstrukce patří nerovnoměrná doba zdržení. Výhodou je, že vstupní materiál je přiváděn mezi již relativně vysušené částice, tím se zlepšuje fluidovatelnost sušeného materiálu. [8]



Obrázek 20: Kontinuální fluidní sušárna [8]

5.3.1 Fluidní sušárny s pístovým tokem

Ve fluidních sušárnách s pístovým tokem jsou do sušicí komory vertikálně umístěny přepážky tak, aby se částice sušeného materiálu pohybovaly v úzkém průřezu sušárny. Částice nepřetržitě proudí jako zátka od vstupu směrem k výstupu ze sušárny. Tím je zajištěna téměř stejná doba zdržení pro všechny částice a stejná výsledná kvalita produktu. [8]



Obrázek 21: Fluidní sušárna s pístovým tokem [8]

6 Výpočet bilance horkovzdušné sušárny

Pro návrh fluidní sušárny pro biomasu byl vytvořen výpočtový model v prostředí MS Excel. První výpočty řešily celkovou bilanci materiálu, sušiny materiálu a obsahu vody v materiálu na vstupu a výstupu ze sušárny. Dále byl vypočten potřebný průtok sušícího média, v tomto případě se jednalo o vzduch, a do výpočtového modelu byla zařazena recirkulace vzduchu odchozího ze sušárny. V dalším kroku bylo nutné spočítat fluidní charakteristiky materiálu a minimální rychlost fluidace. Poté byl zařazen výpočet kinetiky sušení a výpočet objemové plošné odpařivosti, která je pro návrh velikosti fluidní sušárny klíčová. Cílem tohoto výpočtu bylo získat alespoň přibližnou znalost součinitele přestupu tepla ve vrstvě α , která byla získána pomocí korelačních rovnic z literatury, a ten následně přepočítat na objemovou odpařivost. Z literatury lze přímo získat hodnoty objemových odpařivostí, které mají však značný rozptyl a často se liší i řádově.

6.1 Okrajové podmínky výpočtu

Sušeným materiálem pro výpočet byla uvažována buková dřevní štěpka. V následující tabulce jsou uvedeny vlastnosti tohoto materiálu. Hustota dřeva je určena při obsahu vody 50 %. Vlastnosti materiálu byly dohledané pomocí zdrojů nebo byly voleny po domluvě s vedoucím práce. Jednotlivé částičky štěpky byly uvažovány jako kvádry.

Sušícím médiem byl vlhký vzduch. Veličiny, které byly po celou dobu výpočtu považovány za konstantní jsou uvedeny v tabulce 2. Použité značení jednotlivých míst je stejné jako na obrázku 22.

Tabulka 2: Okrajové podmínky pro výpočet

Symbol	Veličina	Hodnota	Jednotka
Vlhký vzduch			
$c_p \text{ voda}$	Měrná tepelná kapacita vody	4,2	$\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$
$c_p \text{ pára}$	Měrná tepelná kapacita páry	1,9	$\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$
$c_p \text{ sv}$	Měrná tepelná kapacita suchého vzduchu	1,01	$\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$

Sušený materiál			
$c_{psu\dot{s}}$	Měrná tepelná kapacita sušiny	1,3	$kJ/kg \cdot K$
ρ_{mat}	Hustota	800	kg/m^3
	Rozměry částic	5,5 · 4 · 1,3	mm
ε	Mezerovitost	0,5	—

Dále bylo nutné zvolit vstupní a výstupní výpočtové hodnoty. Výstupní teplota a relativní vlhkost vzduchu na výstupu ze sušárny jsou pro základní výpočet odhadnuty po konzultaci s vedoucím práce. V tabulce 3 jsou také uvedeny hodnoty vstupního a výstupního obsahu vody sušeného materiálu.

Tabulka 3: Volené hodnoty pro výpočet

Symbol	Veličina	Hodnota	Jednotka
Vlhký vzduch			
T_2	Výstupní teplota	50	$^{\circ}C$
φ_2	Výstupní vlhkost	70	%
Sušený materiál			
W_0	Vstupní obsah vody	50	%
W_1	Výstupní obsah vody	10	%

V tabulce 4 jsou zobrazeny výpočtové hodnoty okolního prostředí, které jsou uvažovány po dobu sušení jako konstantní.

Tabulka 4: Hodnoty okolního prostředí pro výpočet

Symbol	Veličina	Hodnota	Jednotka
p_{nor}	Normální tlak	101 325	Pa
T_{nor}	Normální teplota	20	$^{\circ}C$
g	Gravitační zrychlení	9,81	m/s^2
φ_0	Relativní vlhkost okolního vzduchu	50	%

6.2 Statické výpočty sušeného materiálu

Pro výpočet byl zvolen hmotnostní tok materiálu na vstupu do sušárny na 1000 kg/hod , to odpovídá $0,278 \text{ kg/s}$. Dle rovnic 6.1 až 6.2 byly dopočítány hmotnostní toky sušiny materiálu a vody obsažené v materiálu. Ze znalosti výstupního obsahu vody a hmotnostního toku sušiny na vstupu, která bude stejná i na výstupu byl vypočten hmotnostní tok materiálu a vody na výstupu ze sušárny. Hmotnostní tok vysušené vody z materiálu je proveden v rovnici 6.3.

$$\dot{m}_{suš\ 0} = (1 - W_0) \cdot \dot{m}_{mat\ 0} = 0,139 \text{ kg/s} \quad (6.4)$$

$$\dot{m}_{w\ 0} = W_0 \cdot \dot{m}_{mat\ 0} = 0,139 \text{ kg/s} \quad (6.5)$$

$$\dot{m}_{suš\ 0} = \dot{m}_{suš\ 2} \quad (6.6)$$

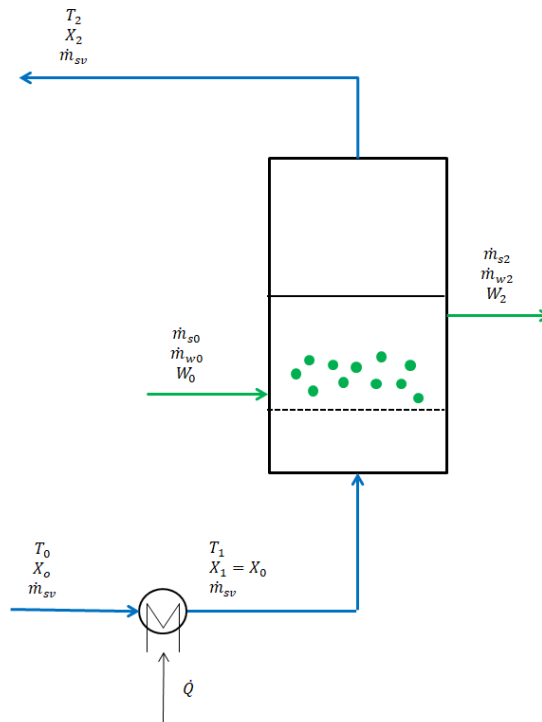
$$\dot{m}_{mat\ 2} = \frac{\dot{m}_{suš\ 2}}{(1 - W_2)} = 0,154 \text{ kg/s} \quad (6.7)$$

$$\dot{m}_{w\ 2} = W_2 \cdot \dot{m}_{mat\ 2} = 0,015 \text{ kg/s} \quad (6.8)$$

$$\dot{m}_{\Delta w} = \dot{m}_{w\ 0} - \dot{m}_{w\ 2} = 0,123 \text{ kg/s} \quad (6.9)$$

6.3 Statické výpočty sušícího vzduchu při fluidním sušení

Schéma fluidní sušárny bez uvažování recirkulace vzduchu je zobrazeno na obrázku 22. Cílem je získat potřebný hmotnostní průtok vzduchu fluidní sušárnou.



Obrázek 22: Schéma statiky fluidní sušárny

Odpařená voda z materiálu přechází ve formě vodní páry do sušícího vzduchu a tím zvyšuje jeho vlhkost. Ze známé měrné vlhkosti na vstupu a výstupu ze sušárny a hmotnostního toku odpařené vody ze sušeného materiálu lze určit potřebný průtok suchého sušícího vzduchu sušárnou. Postup výpočtu hmotnostního toku sušícího média je uveden v rovnici 6.10. Pro tyto výpočty je nutné znát absolutní vlhkosti vlhkého vzduchu na vstupu a výstupu ze sušárny. Tyto hodnoty byly zjištěny pomocí doplňku CoolProp ve výpočtovém modelu MS Excel. Dále byly obdobným způsobem zjištěny jednotlivé entalpie vzduchu. Hodnoty jsou přehledně zobrazeny v tabulce 5. Stav 0 je uvažován před sušárnou. Stav 1 se nachází za výměníkem pro ohřev sušícího vzduchu, tedy stav před sušící komorou. Stav 2 je uvažován jako stav za sušárnou, tudíž po průchodu sušící komorou.

Tabulka 5: Přehled hodnoty vzduchu pro sušení bez recirkulace

Symbol	Veličina	Stav 0	Stav 2	Jednotka
T	Teplota vzduchu	20	50	$^{\circ}\text{C}$
φ	Relativní vlhkost	50	70	%
X	Měrná vlhkost	0,0073	0,0584	$\text{kg}_W/\text{kg}_{sv}$
h	Entalpie	38,62	201,57	kJ/kg_{sv}

$$\dot{m}_{sv} = \frac{\dot{m}_{\Delta w}}{X_{v1} - X_{v0}} = 2,42 \text{ kg}_{sv}/s \quad (6.11)$$

6.4 Tepelná bilance

Energetická bilance slouží k určení potřebného množství dodaného tepla do systému. Celkové teplo potřebné pro sušení $Q_{suš}$ se skládá z tepla na ohřev sušiny a vody $Q_{ohřev}$ vázané v materiálu z teploty okolí na teplotu mokrého teploměru, dále z latentního tepla odpařené vody Q_{odpar} . Následně z tepla, které je potřebné na přehřátí odpařené vody $Q_{přehřátí}$ z teploty mokrého teploměru na výchozí teplotu vzduchu ze sušárny. V poslední řadě je třeba započítat také citelné teplo potřebné na ohřátí suchého vzduchu a páry ve vzduchu obsaženou $Q_{ohřev vv}$ z teploty okolí na teplotu vzduchu na výstupu ze sušárny. V tomto případě jsou spočítány jednotlivé tepelné výkony, které je nutno do systému dodávat.

$$\dot{Q}_{suš} = \dot{Q}_{ohřev} + \dot{Q}_{odpar} + \dot{Q}_{přehřátí} + \dot{Q}_{ohřev vzduchu} \quad (6.12)$$

$$\dot{Q}_{ohřev} = \dot{Q}_{suš} + \dot{Q}_w = \dot{m}_{suš0} \cdot c_{p suš} \cdot (t_{mk} - t_o) + \dot{m}_{w0} \cdot c_{p w} \cdot (t_{mk} - t_o) \quad (6.13)$$

$$Q_{ohřev} = 18,5 \text{ kW} \quad (6.14)$$

$$\dot{Q}_{odpar} = \dot{m}_{\Delta w} \cdot l_{výp}(t_{mk}) = 295,9 \text{ kW} \quad (6.15)$$

$$\dot{Q}_{přehřátí} = \dot{m}_{\Delta w} \cdot c_{p páry} \cdot (t_2 - t_{mk}) = 3,2 \text{ kW} \quad (6.16)$$

$$\dot{Q}_{ohřev vv} = \dot{m}_{sv} \cdot c_{p sv} \cdot (t_2 - t_o) + X_0 \cdot \dot{m}_{sv} \cdot c_{p páry} \cdot (t_2 - t_o) = 74 \text{ kW} \quad (6.17)$$

$$\dot{Q}_{suš} = 391,6 \text{ kW} \quad (6.18)$$

Teplenou náročnost sušení lze také získat pomocí jiného postupu, a to rozdílem tepla na výstupu a na vstupu do sušárny. Tento postup je popsán v rovnicích 6.19 až 6.20.

$$\dot{Q}_{suš} = \dot{Q}_2 - \dot{Q}_0 \quad (6.21)$$

Teplo v materiálu na vstupu do sušárny

$$Q_{mat0} = \dot{m}_{suš0} \cdot c_{p suš} \cdot t_o + \dot{m}_{w0} \cdot c_{p w} \cdot t_o = 15,6 \text{ kW} \quad (6.22)$$

Teplo v sušicím vzduchu na vstupu do sušárny

$$\dot{Q}_{vv0} = \dot{m}_{sv} \cdot h_{v0} = 93,4 \text{ kW} \quad (6.23)$$

Teplo v materiálu na výstupu ze sušárny

$$\dot{Q}_{mat2} = \dot{m}_{suš2} \cdot c_{p\ suš} \cdot t_{mk} + \dot{m}_{w2} \cdot c_{p\ w} \cdot t_{mk} = 11,4 \text{ kW} \quad (6.24)$$

Teplo v sušicím vzduchu na výstupu ze sušárny

$$\dot{Q}_{vv2} = \dot{m}_{sv} \cdot h_{v2} = 487,3 \text{ kW} \quad (6.25)$$

Celkové teplo na vstupu do sušárny

$$\dot{Q}_0 = \dot{Q}_{mat0} + \dot{Q}_{vv0} = 108,9 \text{ kW} \quad (6.26)$$

Celkové teplo na výstupu ze sušárny

$$\dot{Q}_2 = \dot{Q}_{mat2} + \dot{Q}_{vv2} = 498,7 \text{ kW} \quad (6.27)$$

Teplo potřebné k sušení

$$\dot{Q}_{suš} = \dot{Q}_2 - \dot{Q}_0 = 389,7 \text{ kW} \quad (6.28)$$

Důležitým parametrem sušáren je teoretická náročnost sušení, která vyjadřuje potřebné teplo k vypaření 1 kg vody.

$$E_{sušení} = \frac{Q}{\dot{m}_{\Delta w}} = 3158 \text{ kJ/kg}_w \quad (6.29)$$

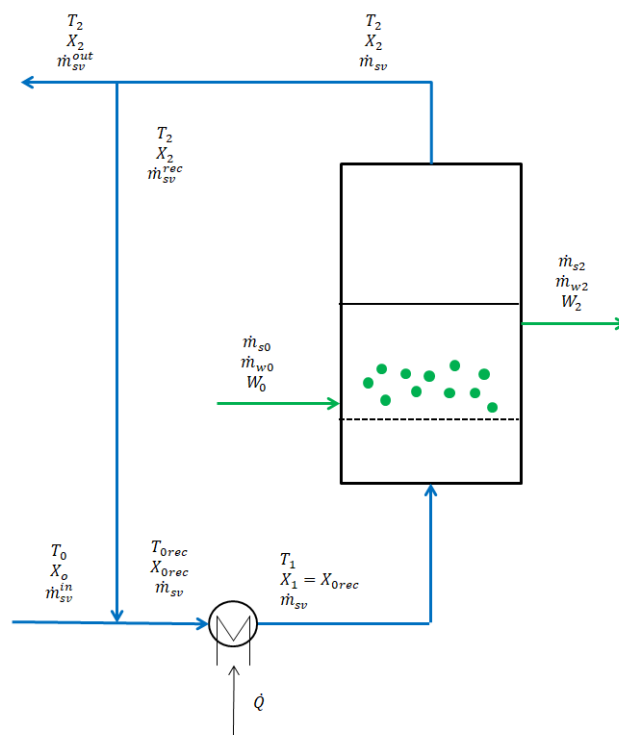
Nyní lze dopočítat entalpii vlhkého vzduchu před vstupem do sušicí komory, ze které pomocí doplňku získáme jeho teplotu, která nesmí být příliš vysoká, aby nedošlo k samovznícení sušeného materiálu. Když by teplota sušicího vzduchu byla vyšší než teplota samovznícení sušeného materiálu, bylo by nutné do modelu sušení zahrnout recirkulaci odchozího vzduchu. V tabulce 6 je přehled hodnot důležitých veličin ve stavu na vstupu do sušárny, po ohřevu vzduchu a na výstupu ze sušárny

$$h_{v1} = h_{v0} + \frac{Q_{suš}}{\dot{m}_{sv}} = 199,9 \text{ kJ/kg}_{sv} \quad (6.30)$$

Tabulka 6: Hodnoty vzduchu při sušení

Symbol	Veličina	Stav 0	Stav 1	Stav 2	Jednotka
T	Teplota vzduchu	20	177,2	50	$^{\circ}\text{C}$
φ	Relativní vlhkost	50	0,13	70	%
X	Měrná vlhkost	0,0073	0,0073	0,0584	$\text{kg}_W/\text{kg}_{sv}$
h	Entalpie	38,62	199,9	201,57	kJ/kg_{sv}

6.5 Statika fluidního sušení s recirkulací odchozího vzduchu



Obrázek 23: Schéma statiky fluidní sušárny s recirkulací odchozího vzduchu

Užití recirkulace odchozího vzduchu je důležité kvůli snížení teploty sušícího média vstupující do sušící komory a také s ohledem na fluidní rychlost proudění vzduchu v sušící komoře a regulaci této rychlosti. Ve výpočtu byl zachován hmotnostní tok přiváděného vzduchu na vstupu do sušárny a celkové množství energie dodané jako v předchozím výpočtu. Dochází

k mísení vystupujícího vzduchu ze sušárny a vzduchu vstupujícího do sušárny, tím se změní teplota a měrná vlhkost před sušicí komorou a také průtok vzduchu sušicí komorou.

Poměrné množství recirkulovaného vzduchu R je definováno jako poměr hmotnostních toků recirkulovaného vzduchu a sušícího vzduchu, který proudí přes sušicí komoru. Recirkulační číslo bylo zvoleno následovně:

$$R = \frac{\dot{m}_{sv}^{rec}}{\dot{m}_{sv}} = 0,5 \quad (6.31)$$

Hmotnostní tok vzduchu na vstupu do sušárny byl uvažován stejný jako při výpočtu bez recirkulace vzduchu.

$$\dot{m}_{sv}^{in} = 2,42 \text{ kg}_{sv}/s \quad (6.32)$$

Ze zvoleného recirkulačního čísla $R = 0,5$ dopočítáme potřebný hmotnostní tok skrz sušicí komoru \dot{m}_{sv} a také hmotnostní tok recirkulovaného vzduchu \dot{m}_{sv}^{rec} .

$$\dot{m}_{sv} = \frac{\dot{m}_{sv}^{in}}{(1 - R)} = 4,84 \text{ kg}_{sv}/s \quad (6.33)$$

$$\dot{m}_{sv}^{rec} = R \cdot \dot{m}_{sv} = 2,42 \text{ kg}_{sv}/s \quad (6.34)$$

V dalším kroku je nutné určit entalpii h_{v0rec} a měrnou vlhkost vzduchu X_{sv} , který vznikne mísením hmotnostního toku do sušárny \dot{m}_{sv}^{in} a recirkulovaného vzduchu \dot{m}_{sv}^{rec} .

$$h_{v0rec} = (1 - R) \cdot h_{v0} + R \cdot h_{v1} = 120,09 \text{ kJ/kg}_{sv} \quad (6.35)$$

$$X_{sv} = \frac{\dot{m}_{sv}^{in} \cdot X_{v0} + \dot{m}_{sv}^{rec} \cdot X_{v1}}{\dot{m}_{sv}} = 0,0326 \text{ kg}_W/\text{kg}_{sv} \quad (6.36)$$

Entalpie vzduchu vstupující do sušicí komory h_1 je získána podobným způsobem jako u fluidního sušení bez recirkulace.

$$h_1 = h_{v0rec} + \frac{Q_{suš}}{\dot{m}_{sv}} = 200,72 \text{ kJ/kg}_{sv} \quad (6.37)$$

Pomocí doplňku Coolprop byla získána teplota vzduchu po mísení a teplota vzduchu vstupujícího do sušící komory. Přehled důležitých hodnot veličin vlhkého vzduchu je v tabulce 7. V tabulce jsou zobrazeny jednotlivé stavy.

Tabulka 7: Přehled hodnoty vzduchu pro sušení s recirkulací

Symbol	Veličina	Stav 0	Stav 0 rec	Stav 1	Stav 2	Jednotka
T	Teplota vzduchu	20	35,67	111,25	50	$^{\circ}\text{C}$
φ	Relativní vlhkost	50	86,59	3,4	70	%
X	Měrná vlhkost	0,01	0,03	0,03	0,06	$\text{kg}_W/\text{kg}_{sv}$
h	Entalpie	38,62	120,09	201,08	201,57	kJ/kg_{sv}

6.6 Fluidační charakteristiky

Výstupem výpočtu fluidačních charakteristik je určení potřebné rychlosti vzduchu ve fluidní vrstvě. Nejprve je nutné určit střední průměr částic sušeného materiálu $d_{stř}$. Postup výpočtu sféricity je uveden v rovnicích 6.38 až 6.39. Rozměry částic jsou uvedeny v tabulce 2.

$$S_{1ks} = 2 \cdot ((5,5 \cdot 4) + (4 \cdot 1,3) + (5,5 \cdot 1,3)) = 68,7 \text{ mm}^2 \quad (6.40)$$

$$V_{1ks} = 5,5 \cdot 4 \cdot 1,3 = 28,6 \text{ mm}^3 \quad (6.41)$$

$$V_{1ks} = V_{koule} = \frac{\pi \cdot d_{stř}^3}{6} \Rightarrow d_{stř} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_{1ks}}{\pi}} = 3,8 \text{ mm} \quad (6.42)$$

$$S_{koule} = \pi \cdot d_{stř}^2 = 45,2 \text{ mm}^2 \quad (6.43)$$

$$\Phi = \frac{S_{koule}}{S_{1ks}} = 0,658 \quad (6.44)$$

Výpočty Arheniova čísla Ar a Reynoldsova čísla Re_{min} , platné pro minimální rychlost fluidace jsou uvedeny v rovnicích 6.45 a 6.46. Hodnota hustoty byla určena $\rho_{vv} =$

$0,9 \text{ kg}_{vv}/\text{m}^3$ a viskozita vlhkého vzduchu $\mu_{vv} = 2,19 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, které jsou pro výpočet Ar a Re_{min} počítány pomocí doplňku CoolProp do MS Excel z hodnot suchého vzduchu před sušicí komorou s užitou recirkulací a recirkulačním číslem

$$\text{Ar} = \frac{d_{stř}^3 \cdot \rho_{vv} \cdot (\rho_{mat} - \rho_{vv})}{\mu_{vv}^2} = 962\,146 \quad (6.47)$$

$$\text{Re}_{min} = \frac{d_{stř} \cdot u_{min} \cdot \rho_{vv}}{\mu_{vv}} \quad (6.48)$$

Reynoldsovo číslo bylo vypočtené z kvadratické rovnice 6.49. Rovnice pro výpočet koeficientů a a b jsou uvedeny v rovnici 6.50 a 6.51. Minimální rychlost fluidace se vypočítá z rovnice pro výpočet Reynoldsova čísla 6.52. Hodnota mezerovistosti ϵ byla zvolena 0,5.

$$a \cdot \text{Re}_{min}^2 + b \cdot \text{Re}_{min} - \text{Ar} = 0 \quad (6.53)$$

$$a = \frac{1,75}{\epsilon \cdot \Phi} \quad (6.54)$$

$$b = \frac{150 \cdot (1 - \epsilon)}{\epsilon^3 \cdot \Phi^2} \quad (6.55)$$

$$u_{min} = \frac{\text{Re}_{min} \cdot \mu_{vv}}{d_{stř} \cdot \rho_{vv}} = 1,75 \text{ m/s} \quad (6.56)$$

Konečná rychlost vzduchu u se získá součinem minimální rychlosti fluidace a rychlostního součinitele k , ten byl zvolen na hodnotu 2 podle literatury, která uvádí rozsah součinitele 2 až 3. [8] Vzorec pro výpočet fluidní rychlosti je uveden v rovnici 6.57.

$$u = k \cdot u_{min} = 3,5 \text{ m/s} \quad (6.58)$$

6.7 Kinetika sušení

Pro určení celkové doby sušení, potažmo doby setrvání jedné vsádky v sušárně je nutné znát součinitel přestupu tepla ve vrstvě α . Sušení probíhá v různých fázích, které již byly popsány. Pro zjednodušení je uvažováno, že čas potřebný na ohřev materiálu na teplotu rosného bodu bude pro případ dřevní štěpky velmi krátký. Stejně poslední fáze sušení, kde již nedochází k odpařování povrchové vody, ale vody vázané uvnitř materiálu nebude uvažována. Předpokládá se, že celé sušení probíhá výhradně v první fázi sušení, kdy je rychlost sušení

konstantní a dochází k odpařování volné vody, tedy té na povrchu sušených částic. Tomu také odpovídá hodnota Nussletova čísla Nu , která bude považována za konstantní. Korelační rovnice pro výpočet Nussletova čísla Nu , byla převzata z literatury [8] a již byla uvedena v rovnici (5.4). Pro výpočet Nussletova čísla Nu bylo nutné provést výpočet Prandtlova čísla Pr a Reynoldsova čísla Re . Tepelná vodivost λ byla určena na $0,032 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ a měrná tepelná kapacita vzduchu při konstantním tlaku c_p na $0,032 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$. Hodnoty byly získány pomocí doplňku CoolProp z hodnot teploty a entalpie vzduchu po ohřevu z tabulky 7.

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu_{vv}}{\lambda} = 0,71 \quad (6.59)$$

$$Re = \frac{d_{stř} \cdot u \cdot \rho_{vv}}{\mu_{vv}} = 688 \quad (6.60)$$

$$Nu = 1,01 \cdot Re^{0,48} \cdot Pr^{0,33} = 20,6 \quad (6.61)$$

$$\alpha = \frac{\lambda \cdot Nu}{d_{stř}} = 158,2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (6.62)$$

Byl vypočten logaritmický teplotní spád. Celkový odpařovací tepelný výkon Q_o ve fluidní vrstvě je dán logaritmický teplotním spádem, součinitelem přestupu tepla a plochou všech částic.

$$\Delta T_{ln} = \frac{(t_1 - t_{wb}) - (t_2 - t_{wb})}{\ln \frac{(t_1 - t_{wb})}{(t_2 - t_{wb})}} = 22,3 \text{ K} \quad (6.63)$$

$$Q_o = \alpha \cdot S_{mat} \cdot \Delta T_{ln} = 7\,064 \text{ kW} \quad (6.64)$$

Součinitel přestupu tepla byl přepočítán na tzv. objemový součinitel přestupu tepla. Tento součinitel je vztažen na objem vrstvy včetně mezerovitosti. Pro tento výpočet je nutné ještě dopočítat plochu všech částic, počet částic a objem částic včetně mezerovitosti. Pro sušinu materiálu byla zjištěna hustota $\rho_{suš} = 600 \text{ kg/m}^3$. Tudíž pro materiál na vstupu při obsahu vody 50 % byla hustota $\rho = 800 \text{ kg/m}^3$. Dále byla vypočtena sypaná hmotnost materiálu na vstupu a sypaná hmotnost sušiny.

$$V_{vrstvy} = \frac{\dot{m}_{suš}}{\rho_{suš}} = 0,83 \text{ m}^3 \quad (6.65)$$

$$V_{vstvy}^{s\ mez.} = \frac{V_{vrstvy}}{\epsilon} = 1,67\ m^3 \quad (6.66)$$

$$n = \frac{V_{vrstvy}}{V_{1ks}} = 29\ 137\ 529\ ks \quad (6.67)$$

$$S_{\acute{c}astic} = n \cdot S_{1ks} = 2001,7\ m^2 \quad (6.68)$$

$$\rho_{syp}^{vstup} = \frac{\dot{m}_1}{V_{vstvy}^{s\ mez.}} = 600\ kg/m^3 \quad (6.69)$$

$$\rho_{syp}^{su\acute{s}} = \frac{\dot{m}_{su\acute{s}}}{V_{vstvy}^{s\ mez.}} = 300\ kg/m^3 \quad (6.70)$$

$$\alpha_V = \frac{Q_o}{\Delta T_{ln} \cdot V_{vstvy}^{s\ mez.}} = 190,1\ kW/m^3 \cdot K \quad (6.71)$$

V dalším kroku byla vypočtena měrná objemová odpařivost, která je důležitým parametrem pro návrh sušáren.

$$o_V = \frac{\alpha_V \cdot \Delta T_{ln}}{E_{su\acute{s}}} = 3564\ kg_W/hod \cdot m^3 \quad (6.72)$$

V poslední části byl vypočten objem sušárny, průměr sušárny, výška vrstvy a doba zdržení.

$$V_{su\acute{s}árny} = \frac{\dot{m}_{\Delta vody}}{l_{objem}} = 0,12\ m^3 \quad (6.73)$$

$$S_{su\acute{s}árny} = \frac{\dot{m}_{sv}}{\rho_1 \cdot u} = 4,66\ m^2 \quad (6.74)$$

$$D_{su\acute{s}árny} = \sqrt[2]{\frac{4 \cdot S_{su\acute{s}árny}}{\pi}} = 2,44\ m \quad (6.75)$$

$$H_{vsrtvy} = \frac{V_{su\acute{s}árny}}{S_{su\acute{s}árny}} = 0,026\ m \quad (6.76)$$

$$t = \frac{V_{sušárny}}{\dot{V}_{s\ mez. vstvy}} \cdot 3600 = 269\ s \quad (6.77)$$

Nakonec byla dpočítána tlaková ztráta fluidní vrstvy podle následujícího vztahu.

$$\Delta p = \frac{150 \cdot H \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot \mu}{\varepsilon^2 \cdot \Phi^2 \cdot d_{stř}^2} \cdot u + \frac{1,75 \cdot H \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \rho_{vv}}{\varepsilon^3 \cdot \Phi \cdot d_{stř}} \cdot u^2 = 1000\ Pa \quad (6.78)$$

7 Experimentální měření na horkovzdušné sušárně

Experimentální měření bylo provedeno na vsádkové horkovzdušné sušárně umístěné v těžkých laboratořích Ústavu energetiky ČVUT na Julisce.

Zařízení se skládá ze vstupního potrubí, skrz které je nasáván vzduch do celého zařízení. Průtok vzduchu je zajištěn pomocí ventilátoru, ten je vybaven frekvenčním měničem, který zajišťuje změnu otáček ventilátoru a tím i regulaci průtoku zařízením. Za ventilátorem je umístěna clonka, na které dochází k tlakovému rozdílu, ten slouží ke stanovení průtoku vzduchu. Vzduch poté vstupuje do části, kde je pomocí elektrického ohřevu ohříván na požadovanou teplotu. Ohřátý vzduch proudí přes distributor do sušicí komory, na jejímž konci je umístěn odlučovací cyklon pro záchyt částic, které ulétly z vrstvy. Zachycené částice se hromadí v odšroubovatelné spodní nádobce ve spodní části cyklonu. Vyčištěný vzduch od hrubých částic poté putuje potrubím ven ze zařízení.

Zařízení je osazeno ventilem, který umožňuje mísení odchozího vzduchu se vstupním vzduchem, tzv. recirkulace odchozího vzduchu, která již byla popsána v kapitole 6. Zařízení je dále vybaveno řadou uzavíratelných ventilů na vstupních a výstupních potrubích, které umožňují širší nastavení recirkulačního čísla.

Pomocí termočlánků byla měřena teplota na vstupu do zařízení, teplota za recirkulačním ventilem, teplota za měřicí clonkou, teplota před sušicí komorou a teplota za sušicí komorou. Potrubí za sušicí komorou bylo navíc osazeno snímačem pro měření relativní vlhkosti vzduchu. Diferenční snímač tlaku měřil rozdíl tlaků před a za sušicí komorou. Tento rozdíl tlaků sloužil pro získání hodnot tlakové ztráty distributoru a vrstvy sušeného materiálu.

Sušárna byla opatřena silnou tepelnou izolací, aby nedocházelo k nežádoucím tepelným ztrátám. Samotná sušicí komora byla zaizolována pomocí čtyř odnímatelných částí.

Konstrukce sušárny byla v průběhu měření umístěna na tenzometrických vahách pro přesné zjišťování hmotnosti. Hmotnost a ostatní veličiny jsou v průběhu měření kontinuálně zaznamenávány prostřednictvím měřicí stanice.

7.1 Průběh měření

V prvním kroku bylo nutné zapnutí ventilátoru sušárny, zapnutí topných spirál a následné nastavení požadované teploty na panelu sušárny, který je zobrazen na obrázku 25. Poté se musela nechat celá sušárna prohřát, aby v průběhu měření nedocházelo k dalším

nežádoucím ztrátám. Během této doby bylo nutné připravit materiál pro měření, kterým byla tříděná buková dřevní štěpka.

Příprava materiálu spočívala v přibližném určení jeho množství v odměrné nádobě pomocí rysek označující zaplněný objem nádoby. Zároveň bylo nutné odebrat dostatečné množství reprezentativního vzorku pro určení počáteční vlhkosti materiálu na vstupu do sušárny.

Po dostatečném nahrátí sušárny se mohlo přejít k samotnému měření. Vstup pro plnění sušárny se nachází v nejhornější části sušicí komory. Po naplnění sušicí komory požadovaným množstvím materiálu.

V průběhu měření byly sledovány údaje na měřicí stanici a v pravidelných intervalech byl kontrolován úbytek hmotnosti vzorku, vlhkost a teplota vzduchu za sušicí komorou. Měření bylo ukončeno ve chvíli, kdy bylo uznáno ze sledovaných veličin, že rychlost sušení je již příliš nízká.

Po skončení měření bylo nutné co nejrychleji odebrat všechny sušený materiál. Vstup pro odebrání materiálu se nachází v úrovni nad distributorem. Odebraný materiál byl pro účely kontroly opět zvážen a byla změřena jeho teplota. Z vysušeného materiálu byl opět odebrán reprezentativní vzorek pro určení jeho koncového obsahu vody.

Určení vstupního a výstupního obsahu vody probíhalo v laboratoři. Jednotlivé vzorky materiálu byly vloženy do předem zvážených laboratorních misek a poté byly opět zváženy. Následně byly vzorky umístěny do laboratorní pece. Vysušené vzorky byly opět zváženy a díky úbytku hmotnosti byl určen obsah vody v materiálu.



Obrázek 24: Měřicí stanice



Obrázek 25: Ovládací panel fluidní sušárny



Obrázek 26: Fluidní sušárna

7.1.1 Popis sušeného materiálu a výpočet fluidních charakteristik částic

Sušeným materiálem byla vždy tříděná buková dřevní štěpka. Celkem byly měřeny tři frakce této dřevní štěpky. Pracovně byly tyto materiály označeny jako A, B a C. Rozměry částic materiálu A se pohybovali v rozmezí $(12,9 \div 6,8) \cdot (9,2 \div 4,9) \cdot (1,6 \div 1,4) \text{ mm}$ materiálu B v rozmezí $(6,7 \div 1,8) \cdot (6,8 \div 5,3) \cdot (2 \div 1,1) \text{ mm}$ a materiálu C v rozmezí $(5,6 \div 3,8) \cdot (2,9 \div 1,3) \cdot (1 \div 0,5) \text{ mm}$

Z každé frakce sušeného materiálu byly vybrány tři reprezentativní částice (malá, střední a velká). Částice byly uvažovány jako kvádry a pomocí posuvného měřítka byly změřeny jejich jednotlivé rozměry. Následně pro ně byl vypočten ekvivalentní střední průměr a minimální rychlost fluidace. Minimální rychlost fluidace byla spočtena pro sušení vzduchem o teplotě 70 °C a vlhkosti vzduchu, která odpovídá relativní vlhkosti 50 % při teplotě 20 °C. Obsah vody částic byl uvažován 50 % a hustota sušiny materiálu $\rho_{suš} = 600 \text{ kg/m}^3$. Naměřené a vypočtené hodnoty jsou zobrazeny v tabulkách 8 až 10.

Tabulka 8: Fluidní charakteristiky – materiál A

Částice	Malé	Střední	Velké	
Strana a	6,8	8,9	12,9	[mm]
Strana b	4,9	6,9	9,2	[mm]
Strana c	1,4	1,7	1,6	[mm]
Střední průměr	4,5	5,8	7,1	[mm]
Sféricita	0,63	0,6	0,51	[–]
Minimální rychlost fluidace	1,96	2,32	2,39	[m/s]

Tabulka 9: Fluidní charakteristiky – materiál B

Částice	Malé	Střední	Velké	
Strana a	1,9	4,1	6,3	[mm]
Strana b	6,6	5,6	6,4	[mm]
Strana c	1,3	1,3	1,1	[mm]
Střední průměr	3,1	3,8	4,7	[mm]
Sféricita	0,66	0,66	0,61	[–]
Minimální rychlost fluidace	1,44	1,77	2,01	[m/s]

Tabulka 10: Fluidní charakteristiky – materiál C

Částice	Malé	Střední	Velké	
Strana a	4,6	5,5	3,9	[mm]
Strana b	1,4	1,7	2,9	[mm]
Strana c	0,8	0,6	0,9	[mm]
Střední průměr	2,1	2,2	2,6	[mm]
Sféricita	0,63	0,56	0,64	[–]
Minimální rychlost fluidace	0,82	0,75	1,15	[m/s]



Obrázek 27: Reprezentativní částice materiálu A



Obrázek 28: Porovnání suché a mokré biomasy – materiál A



Obrázek 29: Porovnání suché a mokré biomasy – materiál B



Obrázek 30: Porovnání suché a mokré biomasy – materiál C

7.2 Parametry jednotlivých měření

V tabulce 11 jsou zobrazeny jednotlivá měření a výchozí parametry sušení, které byly tvořeny nastavenou teplotou vzduchu vstupujícího do sušicí komory, průtokem vzduchu, výškou vrstvy materiálu v sušicí komoře a také užitím recirkulace. Tato měření lze rozdělit na dvě základní skupiny.

První skupina se zaměřovala na změnu teploty před sušicí komorou, množství sušeného materiálu, užití recirkulace a také na vliv rovnoměrností uspořádání sušeného materiálu v sušárně. Pro celou skupinu prvního měření byl objemový průtok vzduchu konstantní a dosažená rychlost v sušicí komoře v žádném případě nepřekročila rychlost fluidace. Materiál se ani žádným způsobem během měření nepohyboval a nepromíchal. V této skupině byl měřen pouze materiál A.

Druhá skupina měření se naopak zaměřovala na změnu objemového průtoku vzduchu sušárnou při zachování ostatních výše jmenovaných parametrů. V této skupině byly měřeny materiály A, B a C. V těchto měřeních již při vyšších průtocích docházelo k pohybu částic materiálu a k promíchávání vrstvy materiálu.

Tabulka 11: Parametry jednotlivých sušení

Číslo měření	Sušený materiál	Teplota otopu [°C]	Průtok vzduchu [m ³ /h]	Výška materiálu cm	Užití recirkulace	Poznámka
<i>I</i>	A	80	107	8	Ne	Nevyrovnaná vrstva materiálu
<i>II</i>	A	80	107	4	Ne	
<i>III</i>	A	80	107	8	Ne	
<i>IV</i>	A	60	107	8	Ne	
<i>V</i>	A	60	107	4	Ne	
<i>VI</i>	A	80	107	8	1:1	
<i>VII</i>	A	80	107	8	3:1	
<i>VIII</i>	A	70	50	8	Ne	
<i>IX</i>	A	70	70	8	Ne	
<i>X</i>	A	70	90	8	Ne	
<i>XI</i>	A	70	110	8	Ne	
<i>XII</i>	A	70	135	8	Ne	
<i>XIII</i>	A	70	150	8	Ne	
<i>XIV</i>	A	70	160	8	Ne	

Číslo měření	Sušený materiál	Teplota otopu [°C]	Průtok vzduchu [m ³ /h]	Výška materiálu cm	Užití recirkulace	Poznámka
<i>XV</i>	A	70	190	8	Ne	
<i>XVI</i>	B	70	51	8	Ne	
<i>XVII</i>	B	70	71	8	Ne	
<i>XVIII</i>	B	70	94	8	Ne	
<i>XIX</i>	B	70	109	8	Ne	
<i>XX</i>	B	70	130	8	Ne	
<i>XXI</i>	B	70	148	8	Ne	
<i>XXII</i>	B	70	165	8	Ne	
<i>XXIII</i>	B	70	190	8	Ne	
<i>XXIV</i>	C	70	51	8	Ne	
<i>XXV</i>	C	70	92	8	Ne	
<i>XXVI</i>	C	70	107	8	Ne	
<i>XXVII</i>	C	70	125	8	Ne	
<i>XXVIII</i>	C	70	164	8	Ne	

7.3 Vzorové vyhodnocení měření

Vyhodnocení měření je uvedeno pouze pro měření číslo IX. Postup při vyhodnocování všech dalších měření byl stejný.

Pomocí měřicí stanice, která je zobrazena na obrázku 24 byly zaznamenávány jednotlivé měřené hodnoty. Tyto hodnoty byly ukládány do souboru, s vzorkovací frekvencí 5 s. Z těchto hodnot byly vytvořeny minutové průměry, které dále sloužily pro vyhodnocování měření.

Vážena byla také celková hmotnost materiálu na vstupu a výstupu ze sušárny. Dále byly zaznamenávány časy začátku a konce měření, doba plnění materiálu od sušárny a způsob promíchávání vrstvy, pokud k nějakému docházelo.

7.3.1 Bilance materiálu

Je-li známa hmotnost materiálu na vstupu do sušárny a z analýzy obsahu vody reprezentativního vzorku je známa vstupní vlhkost, lze pomocí jednoduchého výpočtu určit hmotnost sušiny, která v průběhu sušení zůstává stejná, a čistou hmotnost vody na vstupu do sušárny. Podobným způsobem lze určit i bilanci materiálu na výstupu, jejímž výstupem bude koncový obsah vody v materiálu na výstupu ze sušárny. Naměřené a vypočítané hodnoty jsou v tabulce 12 a tabulce 13.

Tabulka 12: Zaznamenávané hodnoty pro měření IX

Průtok	71	m^3/hod
Výška vrstvy	8	cm
Teplota otopu	70	$^{\circ}C$
Doba měření	45	min
Teplota materiálu na výstupu	55	$^{\circ}C$

Tabulka 13: Bilanční výpočty – měření IX

	Vstup	Výstup	
Materiál	0,99	0,512	kg
Obsah vody	50,58	4,45	%
Sušina	0,489	0,489	kg
Voda	0,501	0,023	kg

7.3.2 Určení součinitele přestupu tepla a měrné objemové odpařivosti

Tato podkapitola se věnuje vyhodnocení součinitele přestupu tepla a výpočtu měrné objemové odpařivosti. Měrná objemová odpařivost vyjadřuje vysušenou hmotnost vody z $1 m_{mat}^3$ za jednu hodinu sušení.

$$o_v = \frac{\text{vysušená voda}}{\text{objem materiálu} \cdot \text{čas}} = 253,4 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{hod} \quad (7.1)$$

V případě výpočtu součinitele přestupu tepla je situace složitější. Je nutné spočítat energetickou bilanci sušení, tudíž teplo potřebné pro odpaření daného množství vody. Tento postup je podrobně popsán v kapitole 6. Teploty vstupního vzduchu a teplota vzduchu za sušicí komorou, které jsou nezbytné pro vyhodnocení, byly získány jako průměrné hodnoty z doby celého měření z dat získaných pomocí měřicí stanice. Dále bylo nutné pomocí doplňku CoolProp v MS excel získat teplotu mokrého teploměru, tj. teplotu na kterou je materiál ohříván a výparné teplo při této teplotě.

$$Q_{\text{sušení}} = Q_{\text{ohřev}} + Q_{\text{odpar}} + Q_{\text{přehřítí}} + Q_{\text{ohřev vzduchu}} \quad (7.2)$$

$$Q_{\text{ohřev}} = Q_{\text{suš}} + Q_w = m_{\text{suš}0} \cdot c_{p \text{ suš}} \cdot (t_{mk} - t_o) + m_{\text{s}0} \cdot c_{p w} \cdot (t_{mk} - t_o) \quad (7.3)$$

$$Q_{\text{ohřev}} = 31 \text{ kJ} \quad (7.4)$$

$$Q_{\text{odpar}} = m_{\Delta w} \cdot l_{\text{výp}}(t_{mk}) = 1165 \text{ kJ} \quad (7.5)$$

$$Q_{\text{přehřítí}} = m_{\Delta w} \cdot c_{p \text{ páry}} \cdot (t_2 - t_{mk}) = 11 \text{ kJ} \quad (7.6)$$

$$Q_{ohřev\ vv} = m_{sv} \cdot c_{p\ sv} \cdot (t_2 - t_0) + X_0 \cdot m_{sv} \cdot c_{p\ páry} \cdot (t_2 - t_0) = 1\ 295\ kJ \quad (7.7)$$

$$Q_{sušení} = 2\ 502\ kJ \quad (7.8)$$

Dále bylo nutné dopočítat sušicí výkon a logaritmický teplotní spád podle následujících vztahů. Teploty použité do těchto vztahů byly získány jako průměry z úseku konkrétního měření.

$$\dot{Q}_{sušení} = \frac{Q_{sušení}}{\text{doba sušení}} = 0,93\ kW \quad (7.9)$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{(t_1 - t_{wb}) - (t_2 - t_{wb})}{\ln \frac{(t_1 - t_{wb})}{(t_2 - t_{wb})}} = 24,5\ K \quad (7.10)$$

Objemový součinitel tepla je pak možno dopočítat dle tohoto vztahu.

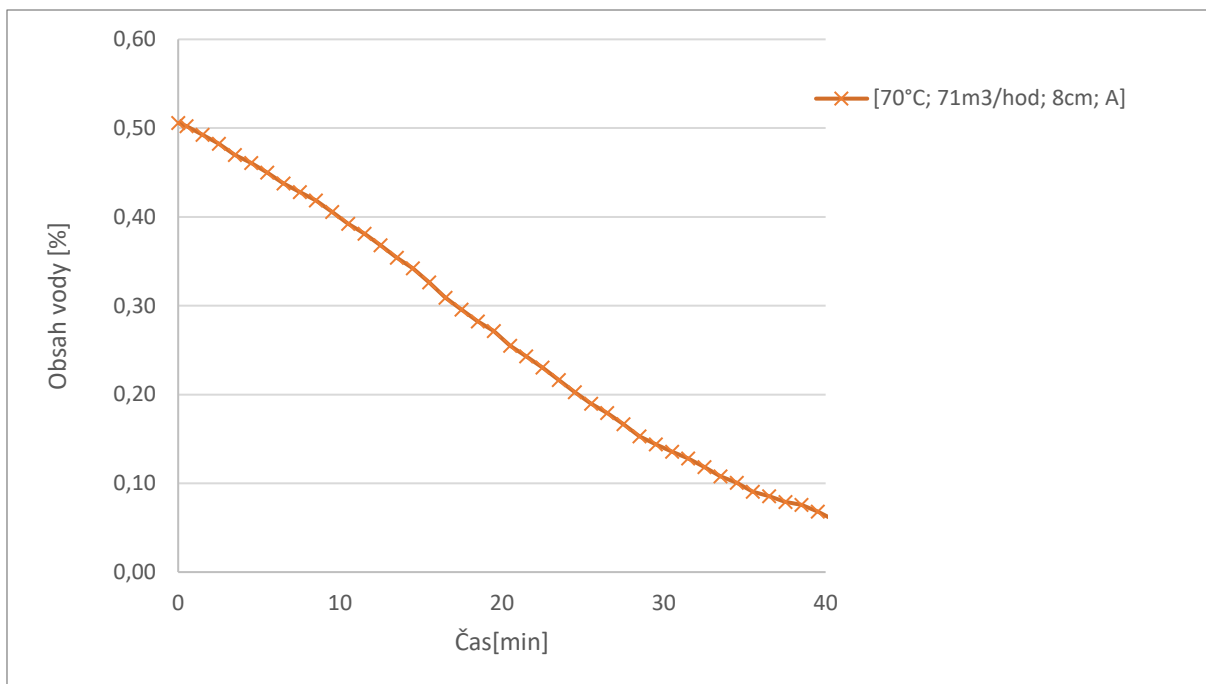
$$\alpha_V = \frac{Q_{sušení}}{\Delta T_{ln} \cdot V_{vrstvy}} = 15\ kW/m^3 \cdot K \quad (7.11)$$

Dále byla vypočtena energetická náročnost sušení čili kolik energie je potřeba na odpaření 1kg vody.

$$E_{sušení} = \frac{Q_{sušení}}{m_{\Delta w}} = 5\ 233\ kJ/kg_w \quad (7.12)$$

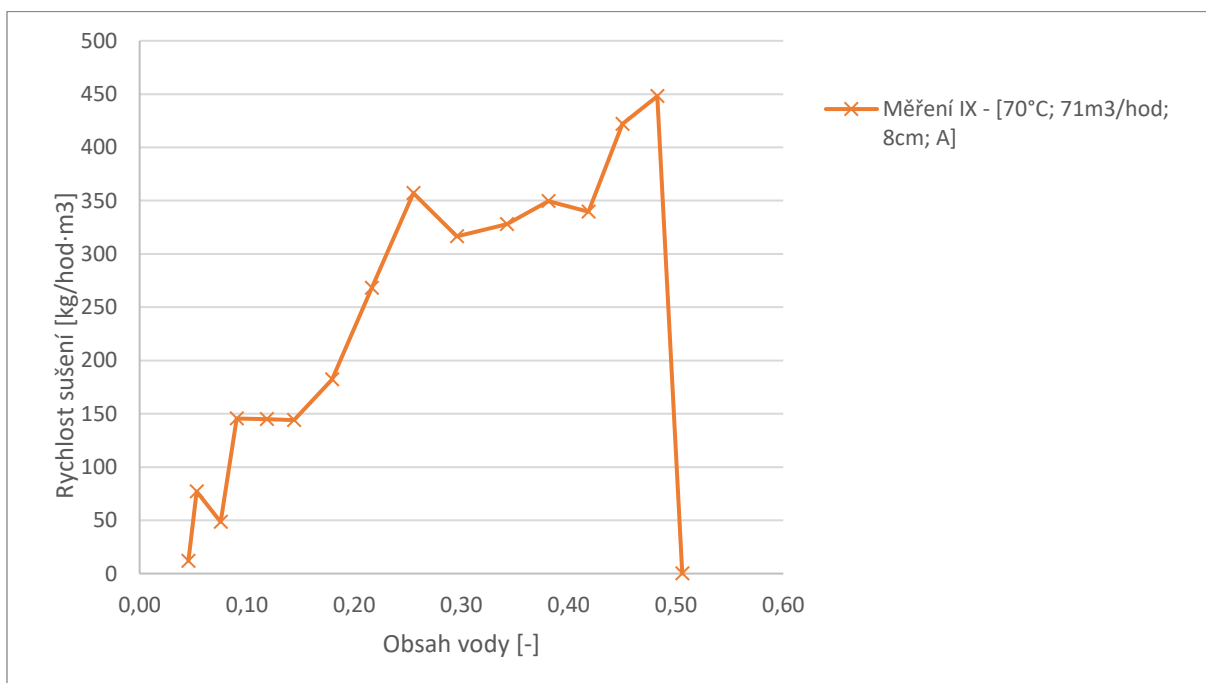
7.4 Vyhodnocení sušicí křivky a křivky rychlosti sušení

Sušicí křivky vyjadřují závislost obsahu vody v materiálu na době sušení. Vyhodnocení sušicích křivek bylo provedeno pomocí údajů získaných z tenzometrických vah, na kterých byla sušárna umístěna. Hodnoty byly zaznamenávány po 5 s. Z těchto hodnot poté byly vytvořeny minutové průměry. Hmotnost na začátku a na konci měření byla změřena na samostatné váze. Hodnoty z tenzometrických vah nebyly na začátku měření odpovídající a přesné především z důvodu plnění sušárny materiálem a instalací izolace okolo fluidní komory. Doba plnění sušárny se u měření pohybovala v rozmezí od 30 do 120 s a údaje jsou v tomto intervalu nahrazeny středními hodnotami z hmotností před a za tímto intervalem.



Obrázek 31: Sušící křivka – měření IX

Křivka rychlosti sušení vyjadřuje závislost rychlosti sušení na obsahu vody v materiálu. Rychlost sušení je počítána jako úbytek hmotnosti materiálu, vztažený na časový úsek a jednotku objemu vrstvy materiálu.



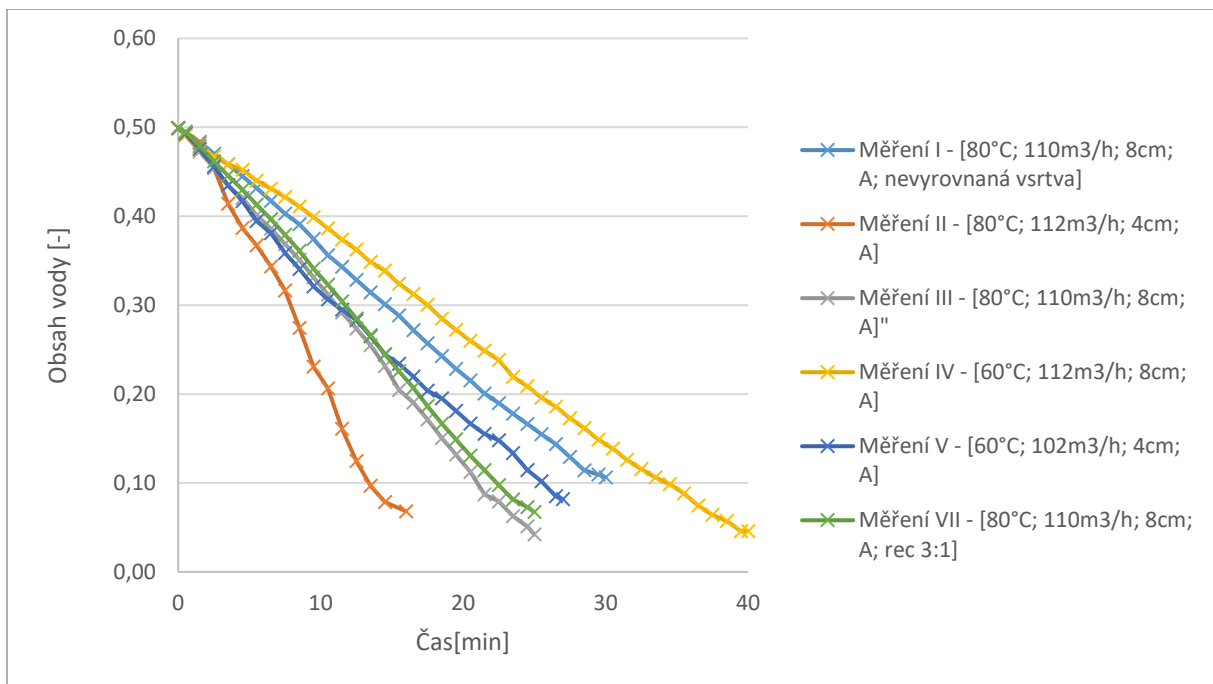
Obrázek 32: Rychlost sušení – měření IX

7.5 Vyhodnocení experimentu

V této kapitole jsou zobrazeny a diskutovány průběhy sušících křivek, průběhy objemových odpařivostí a objemových součinitelů přestupu tepla pro všechna provedená měření.

7.5.1 Sušící křivky a grafy rychlosti sušení

V legendách grafů je uvedeno číslo měření a dále jsou uvedeny základní parametry sušení v pořadí – nastavená teplota otopu, průtok vzduchu, výška vrstvy, použitý typ materiálu a případná poznámka k měření.



Obrázek 33: Sušící křivky – měření I-V a VII

Z porovnání sušících křivek z měření I a III je zřejmé, že nepravidelná výška vrstvy v průřezu sušící komory má výrazný vliv na dobu sušení. Zatímco vysušení materiálu z obsahu vody z 50 % na 10 % v průběhu měření I trvalo 30 min. Doba sušení v případě měření III, kde byla vrstva pravidelně urovnaná, proběhlo sušení na výstupní obsah vody 10 % přibližně o 10 minut rychleji.

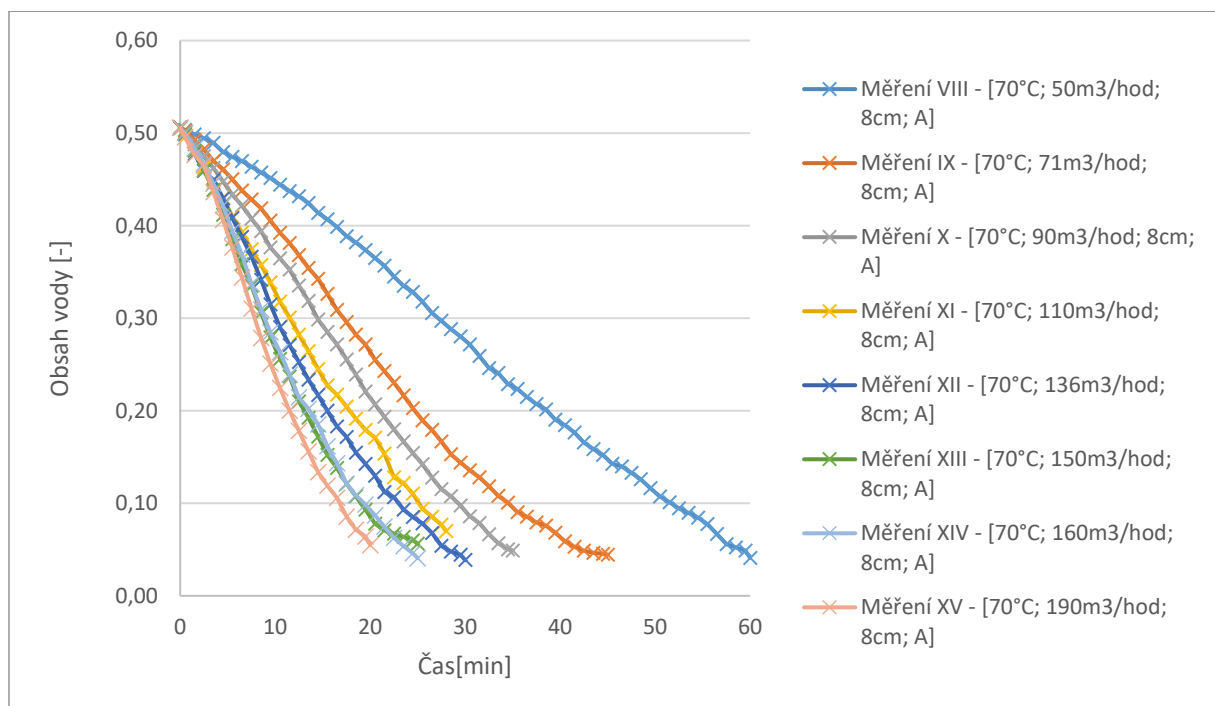
V případně porovnání měření III a IV nebo porovnání měření II a V je zřejmé, že vyšší teplota sušícího média povede k rychlejšímu sušení. V případě měření III a IV byla sušena vrstva materiálu o výšce 8 cm, zvýšení teploty otopu z 60 °C na 80 °C způsobilo, že sušení z obsahu vody z 50 % na 10 % proběhlo o 13 minut rychleji. V případě měření II a V byla

sušena vrstva materiálu o výšce 4 cm, zvýšením teploty otopu z 60 °C na 80 °C způsobilo, že sušení z obsahu vody z 50 % na 10 % proběhlo o 12 minut rychleji.

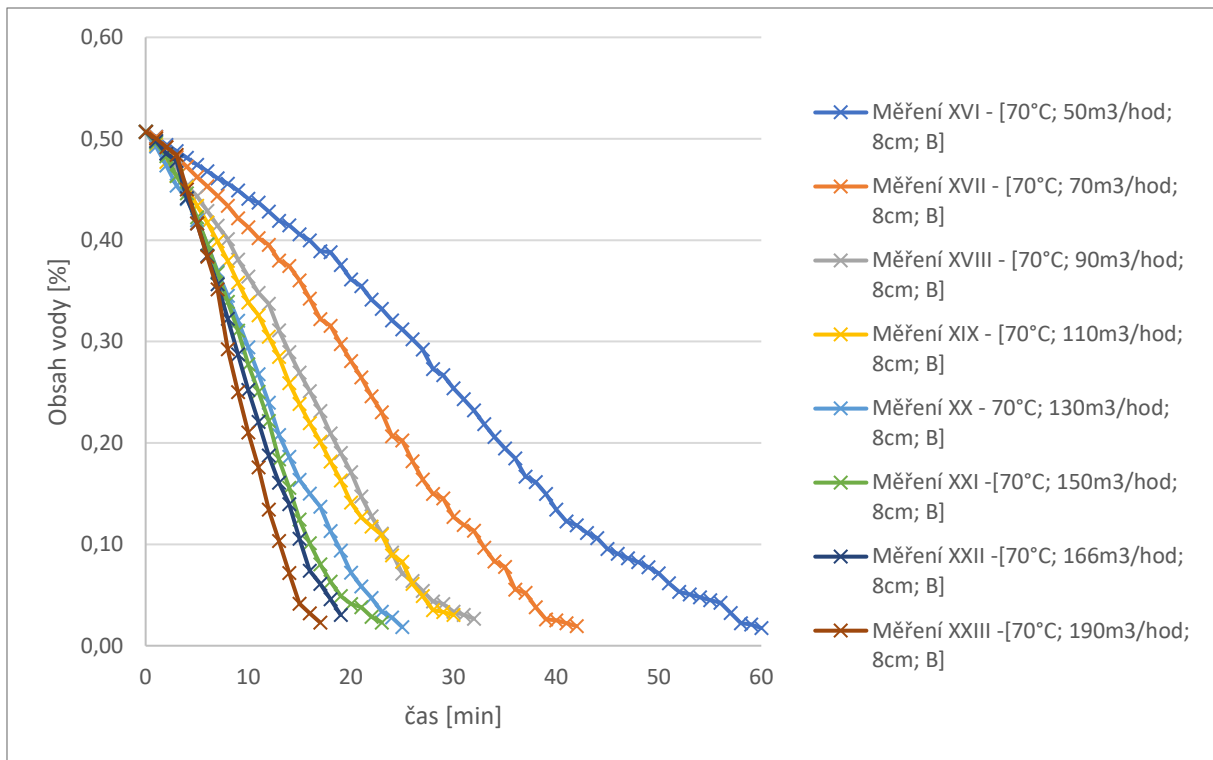
Z obrázku 33 vyplývá, že při porovnání měření II a III má výška vrstvy vliv na dobu sušení. To je způsobeno tím, že je v sušárně méně materiálu a proto bylo vypařeno méně vody.

Z porovnání měření II a VII vyplývá, že při použití recirkulace odchozího vzduchu, které bylo použito u měření VII bude sušení probíhat v první fázi sušení přibližně stejnou rychlostí jako bez použití recirkulace. Ve druhé fázi sušení již sušení s recirkulací probíhá o trochu pomaleji než bez použití recirkulace.

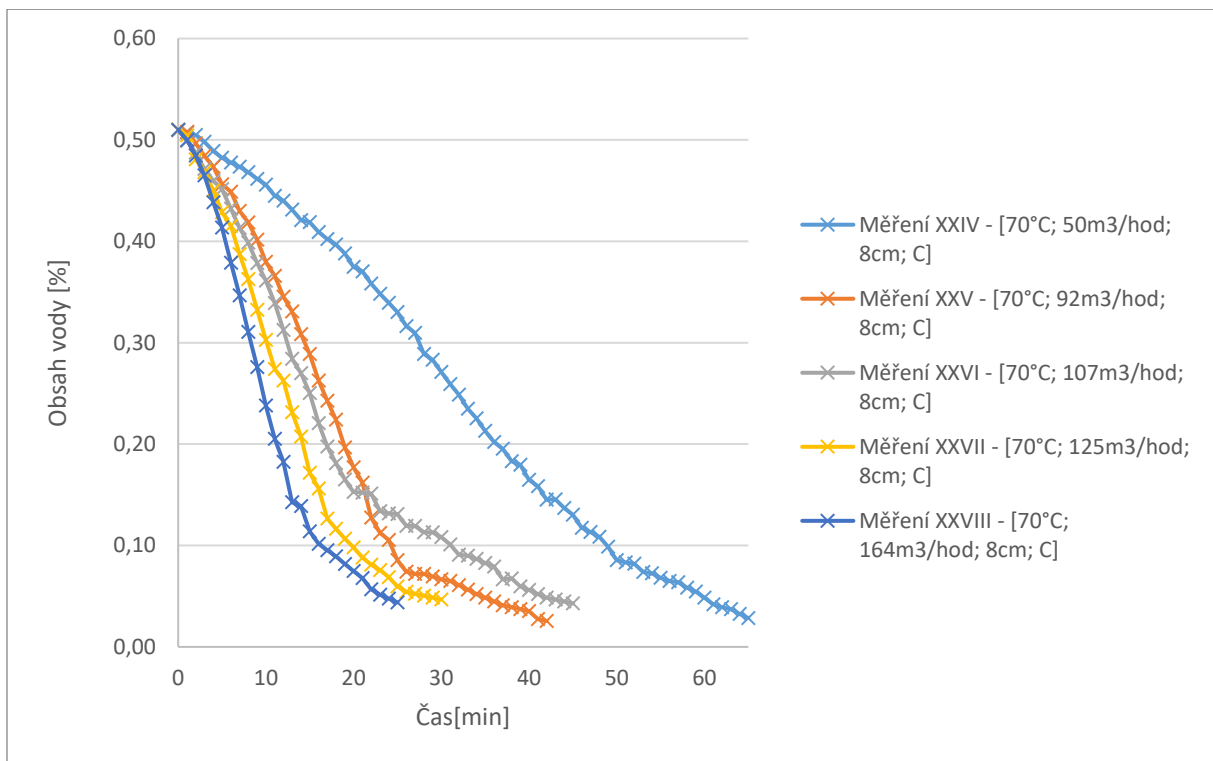
Pro měření číslo VI byla nastavena recirkulace vzduchu přibližně tak, že půlka hmotnostního toku vzduchu byla čerpána z okolí a druhá z již nasyceného vzduchu, který prošel sušicí komorou. Díky tomu byla relativní vlhkost vzduchu za sušicí komorou okolo 70 % a vlivem tepelných ztrát došlo ke kondenzaci vodní páry v navazující části potrubí.



Obrázek 34: Sušící křivky – měření VIII – XV materiál A



Obrázek 35: Sušící křivky – měření XVI – XXIII materiál B



Obrázek 36: Sušící křivky – měření XXIV – XXVIII materiál C

Na obrázcích 34 až 36 jsou zobrazeny sušící křivky při různých průtocích sušícího vzduchu pro materiály A, B a C. Je zřejmé, že zvýšení průtoku sušícího vzduchu a tím pádem i rychlosti proudění povede k rychlejšímu sušení.

Jak již bylo zmíněno při měření I až VII nedocházelo k jakékoliv fluidaci ani k žádnému promíchávání vrstvy.

Při měřeních VIII až XV byl měřen materiál A při různých průtocích sušícího média. Při nízkých průtocích sušícího média $50 - 90 \text{ m}^3/\text{h}$ v měřeních VIII, IX a X nedocházelo k pohybu částic ve vrstvě. Sušení probíhalo od spodu, kdy se ve spodní části vrstvy vyskytovaly suché částice a ve vrchní části vrstvy mokré částice materiálu. Čím déle sušení probíhalo, tím vyšší byla vrstva suchých částic až do doby, kdy byla celá vrstva vizuálně zaplněna suchými částicemi. Při průtoku sušícího média $110 \text{ m}^3/\text{h}$ se hned na začátku měření vytvořil ve středu vrstvy viditelný kanál. V důsledku nízké tlakové ztráty vzniklého kanálu proudila většina sušícího vzduchu skrz tento kanál. Docházelo tím k intenzivnějšímu sušení v oblasti vzniklého kanálu na úkor sušení částic daleko od kanálu. V měření XII při průtoku sušícího média $135 \text{ m}^3/\text{h}$ paradoxně nedošlo k tvorbě kanálu a ani k pohybu částic. Při průtoku sušícího média $150 \text{ m}^3/\text{h}$ došlo po 8 minutách k promíchání vrstvy. Ve vrstvě vnikl kanál a v důsledku místního zvýšení rychlosti kanálu došlo k transportu již vysušených částic ze spodu vrstvy do horní části vrstvy. Poté tento kanál zanikl a vytvořil se nový na jiném místě. Tento proces se stále opakoval. V měření XIII a průtoku sušícího média $160 \text{ m}^3/\text{h}$ byl princip míchání stejný jako v měření XII jen velikost kanálů byla větší a docházelo tím tak k transportu většího množství částic ve větším objemu. Při největším průtoku sušícího média $190 \text{ m}^3/\text{h}$ docházelo k pohybu částic již od začátku sušení. Po několika minutách byla vrstva promíchávána v celém svém objemu, ale k nejvýraznějšímu míchání docházelo v horní části vrstvy.

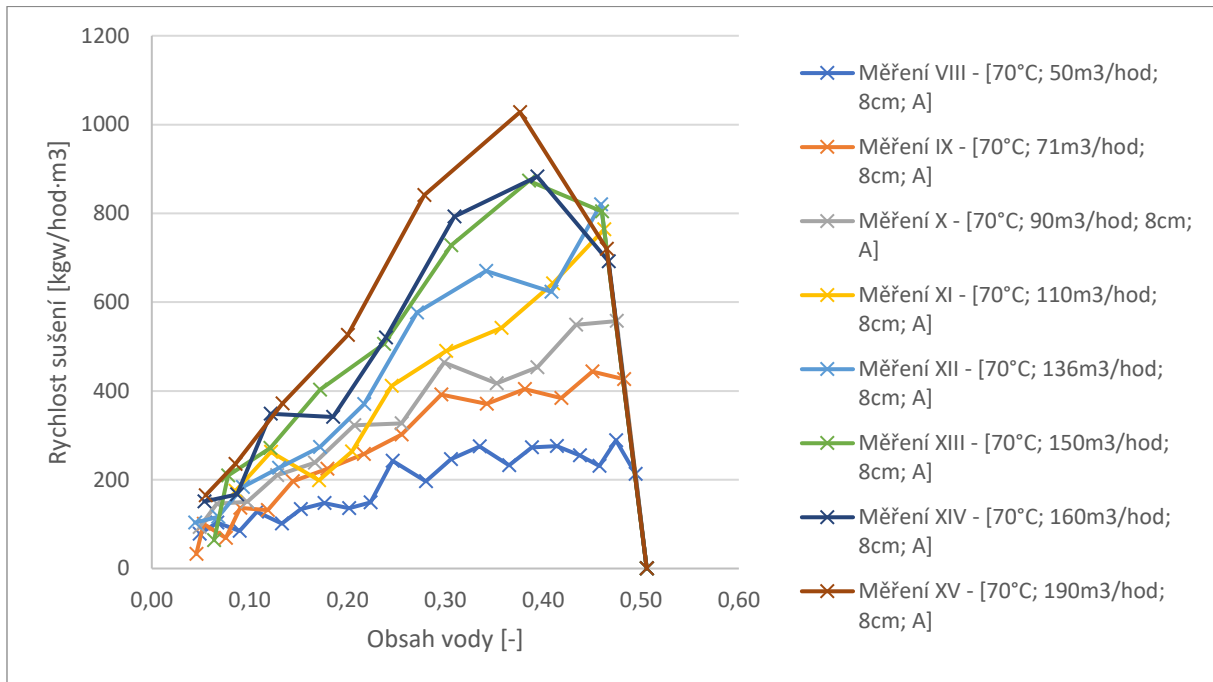
Při měřeních XVI až XXIII byl měřen materiál B při různých průtocích sušícího média. Při měřeních XVI, XVII a XVIII byl průtok vzduchu příliš malý na to, aby docházelo k jakémukoliv pohybu částic. Sušení v těchto měřeních probíhalo od spodu podobně jako u měření VIII, IX a X. V měření XIX, kdy byl průtok vzduchu $109 \text{ m}^3/\text{h}$ se začali ve vrstvě tvořit úzké kanály a materiál se začal částečně pohybovat. Materiál začal souvisle fluidovat po 15 minutách sušení. Při průtoku sušícího média $130 \text{ m}^3/\text{h}$ docházelo k podobnému pohybu jako v předchozím měření. Vzniklé kanálky byly větší a docházelo k míchání materiálu ve větším objemu. Materiál začal ke konci měření rovněž souvisle fluidovat. Při měření XXI byl průtok sušícího média nastaven na $148 \text{ m}^3/\text{h}$. K pohybu materiálu docházelo již od začátku měření. Po 6-ti minutách začal materiál plynule fluidovat. Při měření XXII a XXIII, kdy byl průtok sušícího média $165 \text{ m}^3/\text{h}$ a $190 \text{ m}^3/\text{h}$ docházelo k pohybu materiálu ve vrstvě již od začátku a poměrně rychle se pohyb částic vyvinul ve fluidaci.

Při měřeních XXIV až XXVIII byl měřen materiál C při různých průtocích sušícího média. Při měření XXIV byl průtok sušícího vzduchu $51 \text{ m}^3/\text{h}$ a nedocházelo k žádnému promíchávání materiálu ve vrstvě a materiál se sušil odspodu. Ukázka sušení XXIV je zobrazena na obrázku 37. Při zvýšení průtoku sušícího média na $92 \text{ m}^3/\text{h}$ při měření XXV se na začátku měření vytvořily ve vrstvě dva kanály. Velmi rychle došlo ke srovnání vrstvy částic a po 13-ti minutách sušení začal materiál fluidovat. Fluidace probíhala nejvýrazněji v horní části vrstvy. K pohybu částic materiálu ve spodní části vrstvy sice docházelo, ale nebyl příliš intenzivní. Při měření XXVI, kdy byl průtok sušícího média $107 \text{ m}^3/\text{h}$ byl princip promíchávání podobný jako v předchozím měření, ale pohyb materiálu byl intenzivnější. Po dalším zvýšení průtoku sušícího média na $125 \text{ m}^3/\text{h}$ vznikla fluidace materiálu již od začátku. S rostoucím časem měření a zmenšující se hmotností částic materiálu byla fluidace intenzivnější. Při měření XXVIII byl průtok vzduchu $164 \text{ m}^3/\text{h}$ a k fluidaci docházelo již od začátku měření v plném objemu vrstvy. Průtok vzduchu byl na požadovanou hodnotu zvýšen až po nasypaní materiálu do sušárny, z již zmíněných důvodů. Při dvou posledních měřeních bylo nutné vyprázdnit zásobník pod odlučovacím cyklonem za sušárnou. Došlo k úletu materiálu z vrstvy, řádově se jednalo o nižší desítky gramů, přibližně 1,5 % z počáteční hmotnosti vzorku.

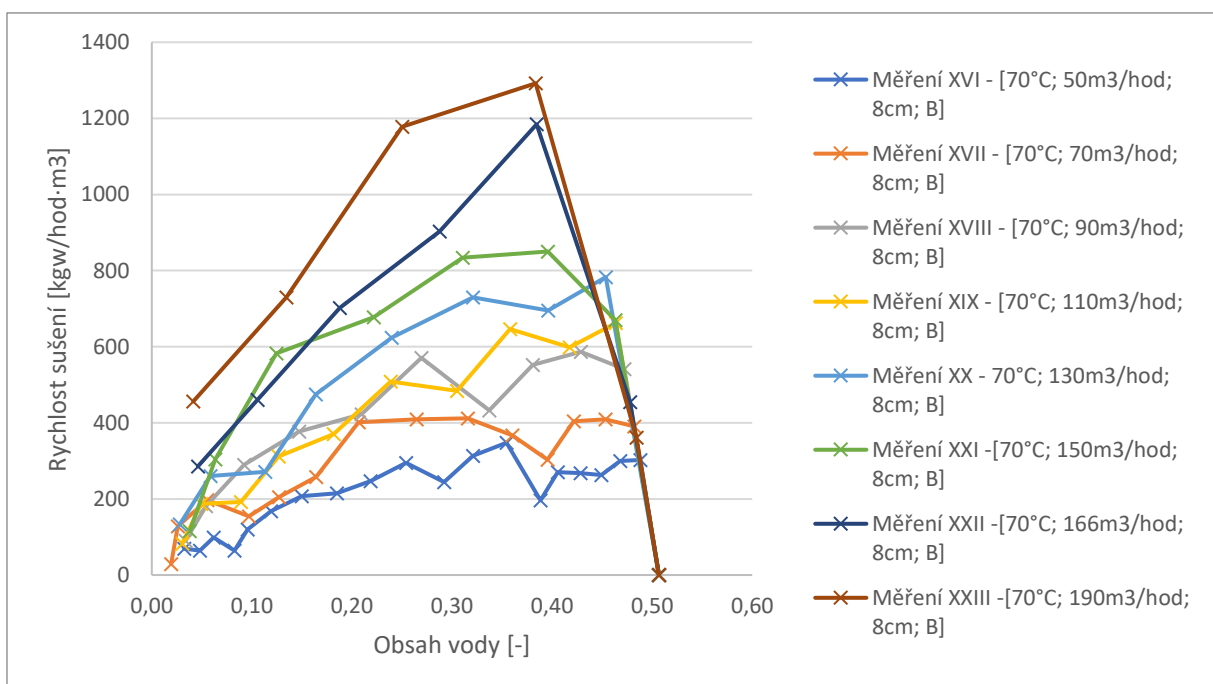


Obrázek 37: Ukázka sušení při malém průtoku vzduchu pro materiál C

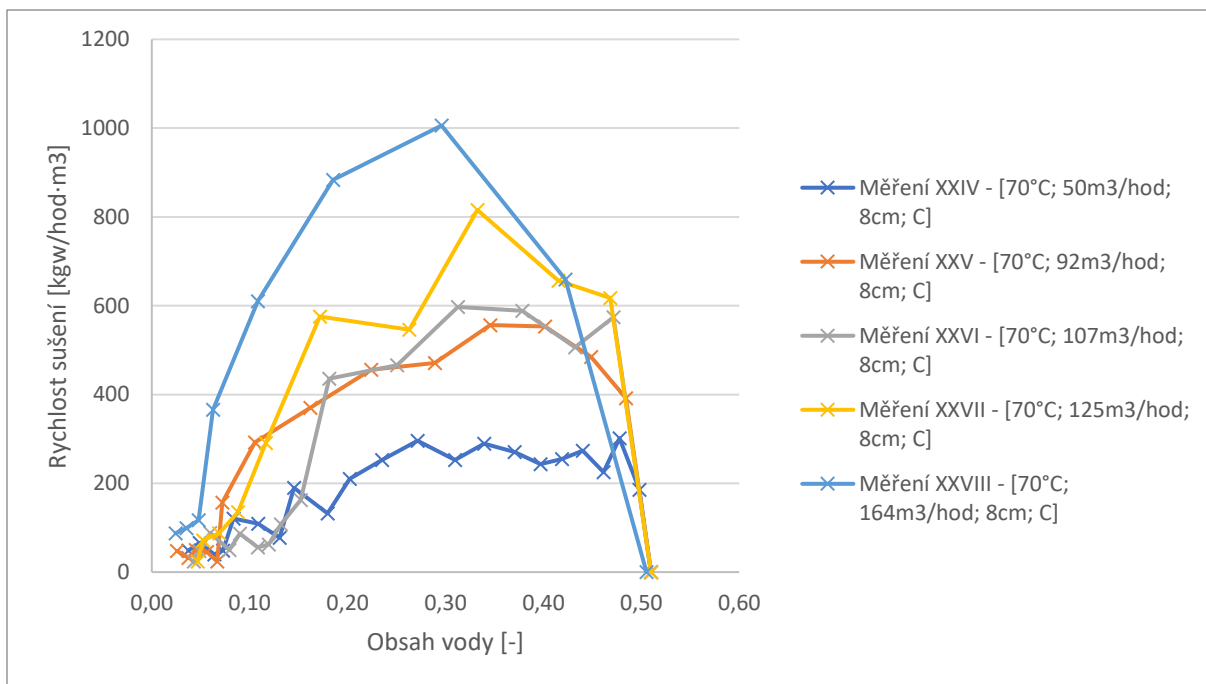
Na obrázcích 38 až 40 je zobrazena závislost rychlosti sušení na obsahu vody. Z těchto obrázků vyplývá, že rychlost sušení je vyšší při vyšším obsahu vody, protože je více vody na povrchu jednotlivých částic odkud se voda odpařuje. Při nižším obsahu vody je voda v materiálu vázána uvnitř částic a nejprve dochází k jejímu transportu k povrchu odkud je opět odpařena.



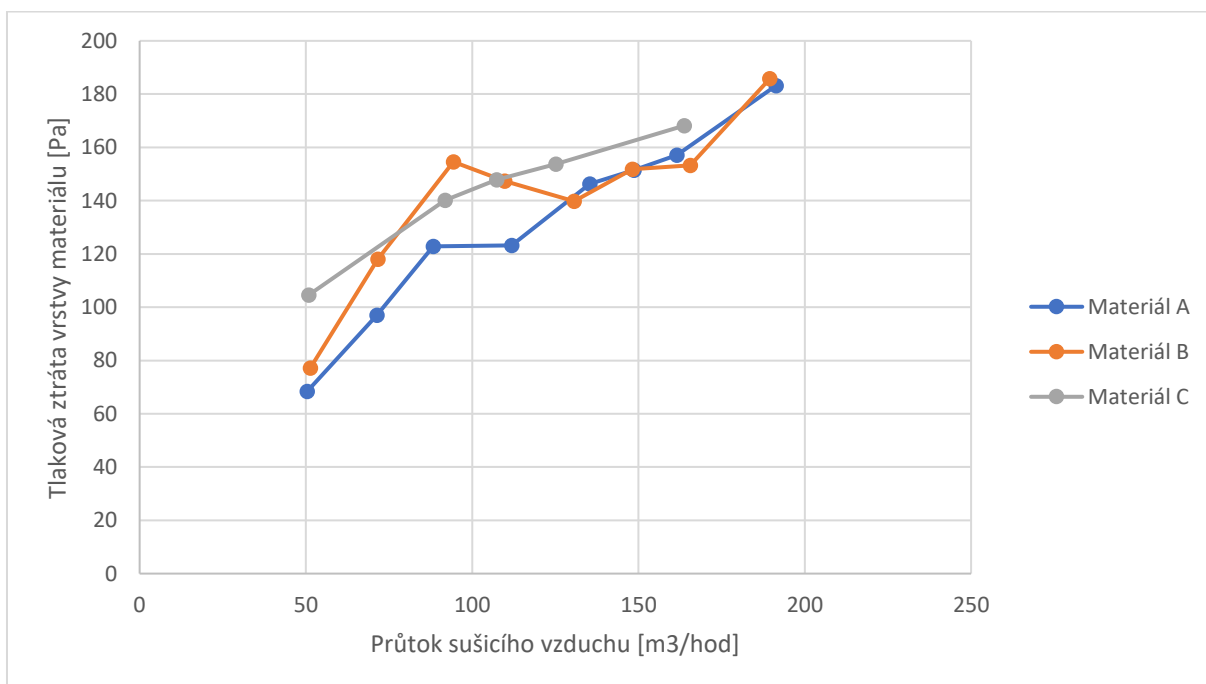
Obrázek 38: Závislost rychlosti sušení na obsahu vody – materiál A



Obrázek 39: Závislost rychlosti sušení na obsahu vody – materiál B



Obrázek 40: Závislost rychlosti sušení na obsahu vody – materiál C



Obrázek 41: Závislost tlakové ztráty vrstvy materiálu na rychlosti proudění vzduchu

Na obrázku 41 je zobrazena závislost tlakové ztráty vrstvy materiálu v sušící komoře na průtoku sušícího vzduchu pro všechny materiály. Z obrázku jednoznačně vyplývá, že tlaková ztráta vrstvy materiálu roste s rostoucím průtokem sušícího vzduchu (s rostoucí rychlostí sušícího vzduchu). Zatímco pro materiál C tlaková ztráta roste plynule s rostoucí rychlostí, u materiálu A a B se v obrázku vyskytují určité propady hodnoty tlakové ztráty. To je způsobeno

tím, že při průtocích sušícího vzduchu okolo $110m^3/hod$ došlo k tvorbě kanálu ve vrstvě materiálu. Pohyb různých materiálů při různých rychlostech je popsán detailněji na straně 73 a 74.

V tabulce 14 jsou zobrazena všechna vyhodnocená data pro všechna měření.

Tabulka 14: Vyhodnocení experimentů

Číslo měření	Počáteční obsah vody	Koncový obsah vody	Průtok vzduchu	Objemový součinitel přestupu tepla	Energetická náročnost sušení	Objemová odpařivost	Doba měření	Rychlost proudění sušicího média
	%	%	m^3/hod	$kW/m^3 \cdot K$	kJ/kg_w	$kg_w/m^3 \cdot hod$	min	m/s
I	49,9	10,6	110	19,9	6994	343	30	0,97
II	49,9	6,8	112	40,8	7409	723	15	0,99
III	49,9	4,2	110	22,6	5491	456	25	0,97
IV	49,9	4,6	112	21,2	6985	282	40	0,99
V	49,9	7,1	102	36,2	9330	401	27	0,91
VI	49,9	7,9	113	21,6	5166	360	30	1
VII	49,9	6,7	112	33,0	5731	452	25	0,99
VIII	50,6	4,1	50	11,2	4798	189	60	0,44
IX	50,6	4,5	71	15	5234	254	45	0,63
X	50,6	4,9	88	18,9	5161	327	35	0,78
XI	50,6	7	112	26,1	4839	504	22	0,99
XII	50,6	3,9	135	25,1	7198	385	30	1,2
XIII	50,6	5,6	149	28,2	6761	451	25	1,3

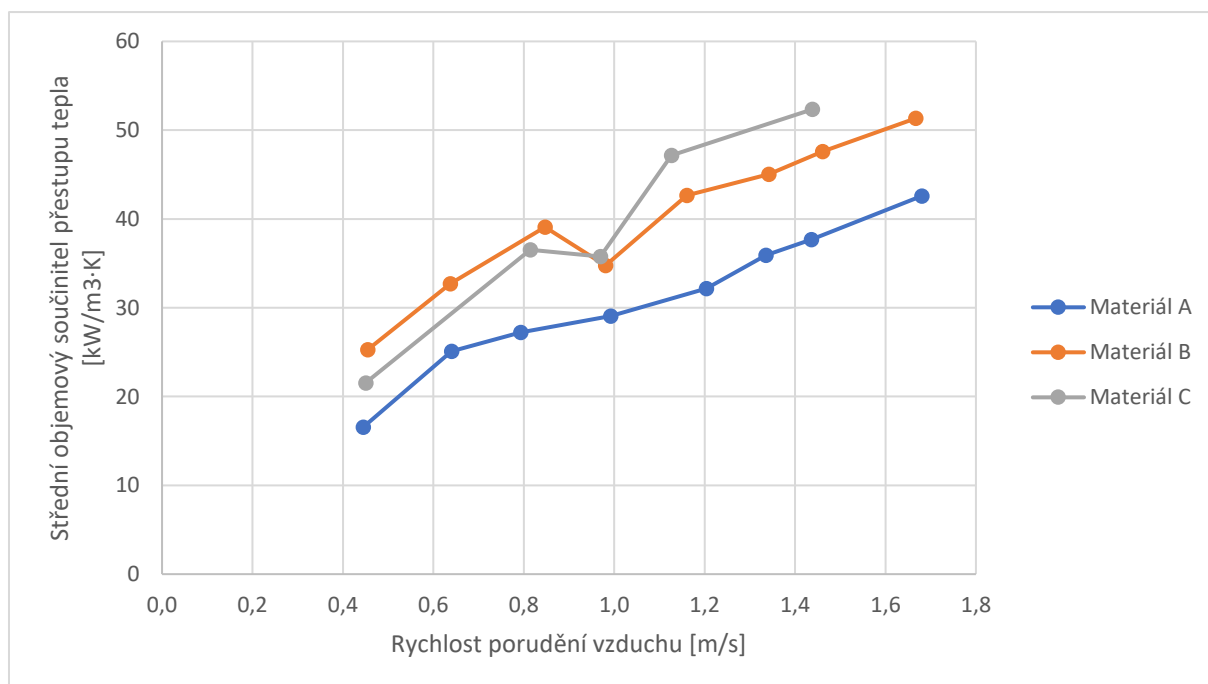
Číslo měření	Počáteční obsah vody	Koncový obsah vody	Průtok vzduchu	Objemový součinitel přestupu tepla	Energetická náročnost sušení	Objemová odpařivost	Doba měření	Rychlost proudění sušicího média
	%	%	m^3/hod	$kW/m^3 \cdot K$	kJ/kg_w	$kg_w/m^3 \cdot hod$	min	m/s
XIV	50,6	4,1	162	29,9	7314	460	25	1,4
XV	50,6	5,5	191	35,8	7216	561	20	1,7
XVI	50,7	1,7	51	12,6	4377	206	60	0,45
XVII	50,7	1,9	72	16,9	4552	290	42	0,63
XVIII	50,7	2,7	94	21,8	4687	382	32	0,83
XIX	50,7	3	110	23,5	5129	404	30	0,97
XX	50,7	1,8	131	27,6	5293	481	25	1,2
XXI	50,7	2,3	148	30,8	5480	535	23	1,3
XXII	50,7	3,04	166	35,9	5175	641	19	1,5
XXIII	50,7	2,3	189	40,2	5418	723	17	1,7
XXIV	51	2,9	51	10,8	5148	181	65	0,45
XXV	51	2,6	92	17,8	5916	281	42	0,81
XXVI	51	4,3	107	18,7	7772	257	45	0,95
XXVII	51	4,7	125	24,0	6169	382	30	1,1
XXVIII	51	4,4	164	30,3	6888	461	25	1,5

7.5.2 Vyhodnocení objemových součinitelů přestupu tepla a objemové odpařivosti

Aby bylo možné součinitele objemové odpařivosti objektivně porovnat byl zde zaveden střední objemový součinitel přestupu tepla. V jednotlivých měřeních byly materiály vysušeny vždy na jiný koncový obsah vody, a tudíž porovnání součinitelů přestupu tepla by nebylo objektivní, protože sušení při nižším obsahu vody probíhá výrazně pomaleji.

Tento součinitel byl spočítán pro sušení z obsahu vody 50 % na 20 %. Materiály při všech měřeních měly vstupní obsah vody okolo 50 % a dobu měření, kdy se materiál dosušil na obsah vody 20 %, lze snadno získat ze sušících křivek.

Na obrázku 42 je zobrazena závislost středního objemového součinitele přestupu tepla na rychlosti proudění pro všechny měřené materiály A, B a C.



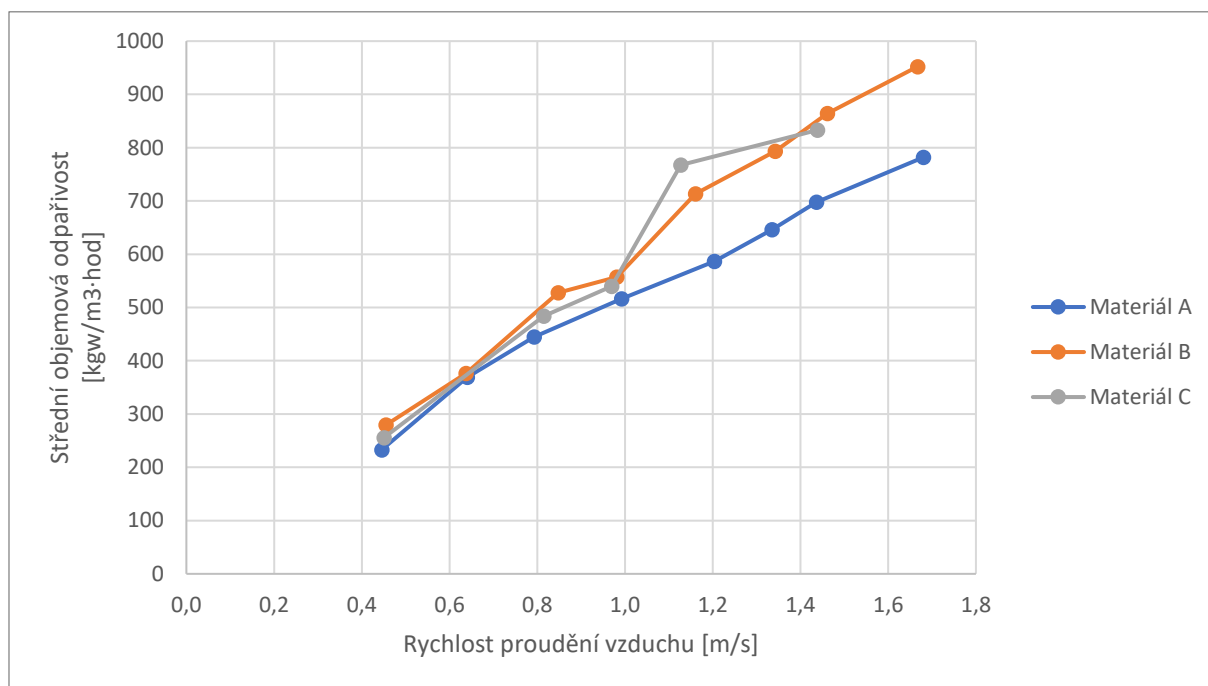
Obrázek 42: Závislost středního objemového součinitele přestupu tepla na rychlosti proudění

Z obrázku 42 jednoznačně vyplývá, že vyšší rychlost proudění vede k vyšší hodnotě součinitele přestupu tepla.

Při rychlostech nad 1 m/s je patrné, že jemnější materiály mají vyšší hodnoty součinitele přestupu tepla než hrubší materiály při stejné rychlosti proudění sušícího média. U materiálu C byla hodnota součinitele přestupu tepla při rychlosti 1,4 m/s přibližně

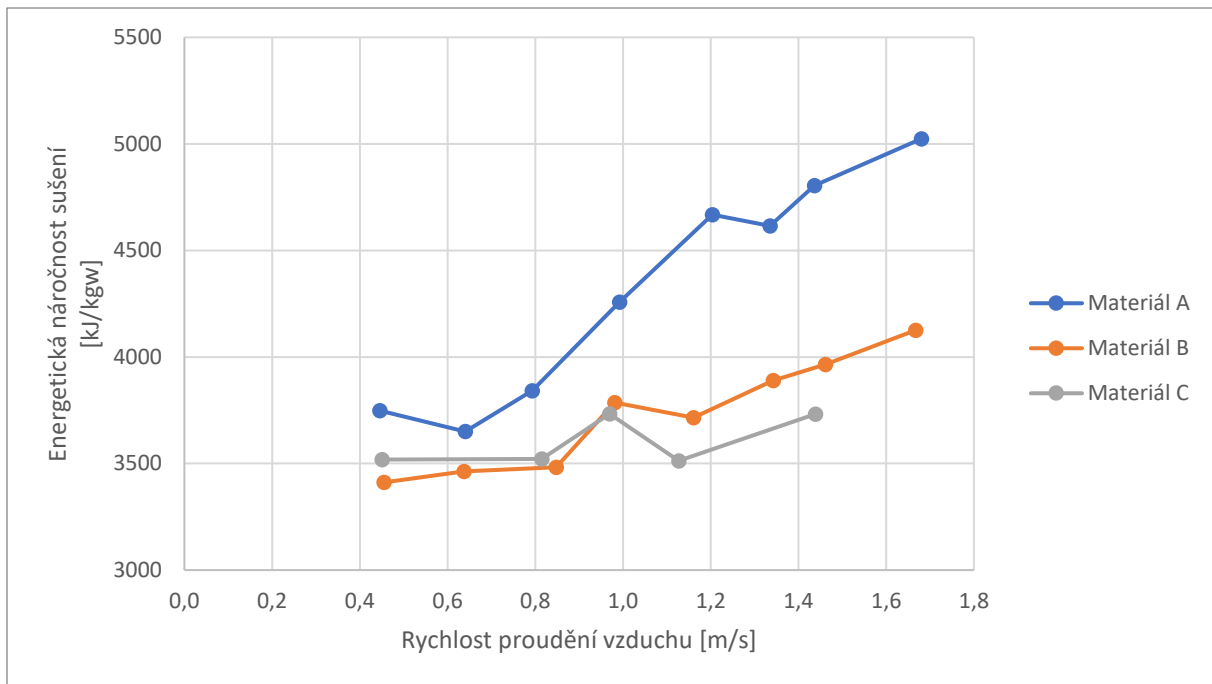
$52 \text{ kW/m}^3 \cdot K$, zatímco u materiálu B $48 \text{ kW/m}^3 \cdot K$ a materiálu C jen $38 \text{ kW/m}^3 \cdot K$ při zachování stejné rychlosti proudění sušicího média. Při rychlostech pod 1 m/s má naopak materiál C nižší hodnoty součinitele přestupu tepla než hrubší materiál B.

Propad součinitele přestupu tepla v okolí rychlosti proudění 1 m/s u materiálů B a C, je způsoben tvorbou jednoho nebo více kanálů ve vrstvě materiálu, kde tímto kanálem proudilo sušící médium více než přes vrstvu materiálu, a proto sušení při těchto rychlostech probíhalo pomaleji.



Obrázek 43: Závislost střední objemové odpařivosti na rychlosti proudění

Na obrázku 43 je zobrazena závislost střední objemové odpařivosti na rychlosti proudění. Při rychlostech do 1 m/s měly všechny materiály přibližně stejné hodnoty součinitele objemové odpařivosti, ty se při rychlosti $0,4 \text{ m/s}$ pohybovaly okolo $260 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{hod}$ a rostly až do rychlosti 1 m/s , kdy se pohybovaly okolo $540 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{hod}$. Při rychlostech nad 1 m/s mají jemnější materiály vyšší hodnoty objemové odpařivosti. Největší objemovou odpařivost měl materiál B při rychlosti proudění vzduchu $1,7 \text{ m/s}$, a to $952 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{hod}$. Materiál C nemohl být měřen při tak vysokých rychlostech, protože by docházelo k jeho úletu ze sušicí komory.



Obrázek 44: Závislost energetické efektivity na rychlosti proudění

Na obrázku 44 je zobrazena závislost energetické náročnosti sušení na rychlosti proudění sušícího média. Z obrázku vyplývá, že vyšší rychlost proudění má významný vliv na energetickou efektivitu sušení. Při vyšších rychlostech opouští vzduch sušárnu s nízkou relativní vlhkostí a relativně vysokou teplotou. V těchto případech by bylo vhodné zařadit recirkulaci odchozího vzduchu a dosáhnout tak vyšší relativní vlhkosti za sušárnou a tím snížit energetickou náročnost na minimum.

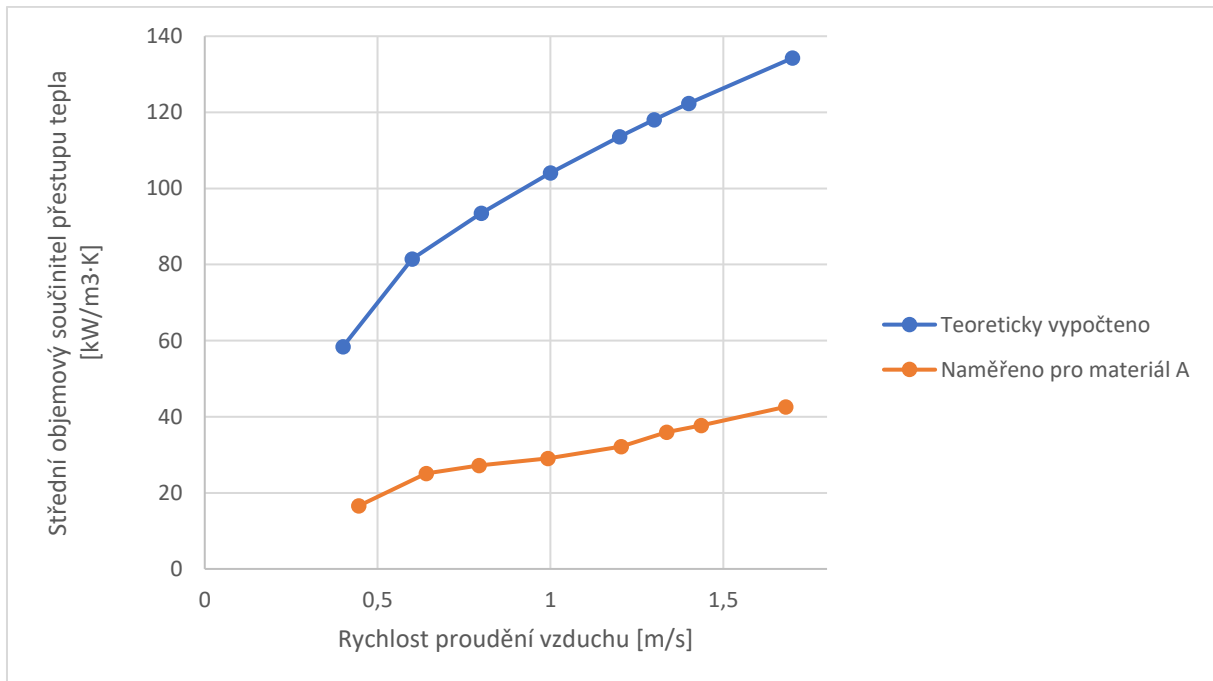
Nejnižší hodnotu energetické náročnosti sušení měl materiál B při rychlosti $0,4 \text{ m/s}$, a to 3410 kJ/kg_w . Naopak nejvyšší hodnotu energetické náročnosti sušení, která dosahovala hodnoty 5020 kJ/kg_w měl materiál A při rychlosti sušícího média $1,7 \text{ m/s}$.

Jistý výkyv z trendu energetické náročnosti sušení při rychlosti 1 m/s u materiálu B a C byl způsoben tvorbou kanálu ve vrstvě, kdy většina vzduchu proudila skrz tento kanál a vzduch na konci sušárny nebyl příliš nasycen vodou.

Z porovnání energetické náročnosti jednotlivých materiálů je zřejmé, že při sušení jemnějších materiálů dochází k lepšímu přestupu tepla, který má za následek nižší energetickou efektivitu než sušení hrubších materiálů.

Při nižších rychlostech sice sušení trvá déle, ale z pohledu energetické náročnosti je to výhodnější, protože sušárnu opouští vychlazený vzduch s vysokou relativní vlhkostí.

Na obrázku 45 je znázorněno porovnání objemového součinitele přestupu tepla mezi teoreticky vypočtenými hodnotami, které byly spočteny podle kritériálních rovnic z kapitoly 5.1 stejným způsobem popsaným v kapitole 6.7, a naměřenými hodnotami pro materiál A. Rozdíl mezi teoretickými a naměřenými hodnotami může být způsoben tím, že hodnota součinitele přestupu tepla byla získána z kritériální rovnice, která uvažuje fluidaci materiálu. V tomto případě k fluidaci materiálu nedocházelo. Materiál se ve statické vrstvě překrýval, tudíž nebyla využita celá plocha povrchu částic pro přestup tepla.



Obrázek 45: Závislost objemového součinitele přestupu tepla na rychlosti proudění vzduchu mezi teoreticky vypočtenými a naměřenými hodnotami

8 Vyhodnocení vlivu rychlosti sušicího média na rychlost sušení a provoz sušárny

Výpočet provedený v kapitole 6 a experimenty provedené a popsané v kapitole 7 sloužily k vyhodnocení vlivu rychlosti proudění na dobu sušení, také bude diskutován vliv recirkulace odchozího vzduchu na sušení.

Uvažován je stejný materiál jako v kapitolách 6 a 7, čili buková dřevní štěpka s rozměry v rozmezí $(6,7 \div 1,8) \cdot (6,8 \div 5,3) \cdot (2 \div 1,1) \text{ mm}$. Tento materiál byl v kapitole 7.1.1 označen jako materiál A. Sušení bylo uvažované jako izoentalpické, tudíž veškeré teplo pro ochlazení sušicího média bylo využito na odpaření vody ze sušeného materiálu. Dále byly uvažovány nulové tepelné ztráty. V tabulce 15 jsou uvedeny další volené hodnoty, které byly použity pro vyhodnocení vlivu rychlosti sušicího média na rychlosti sušení.

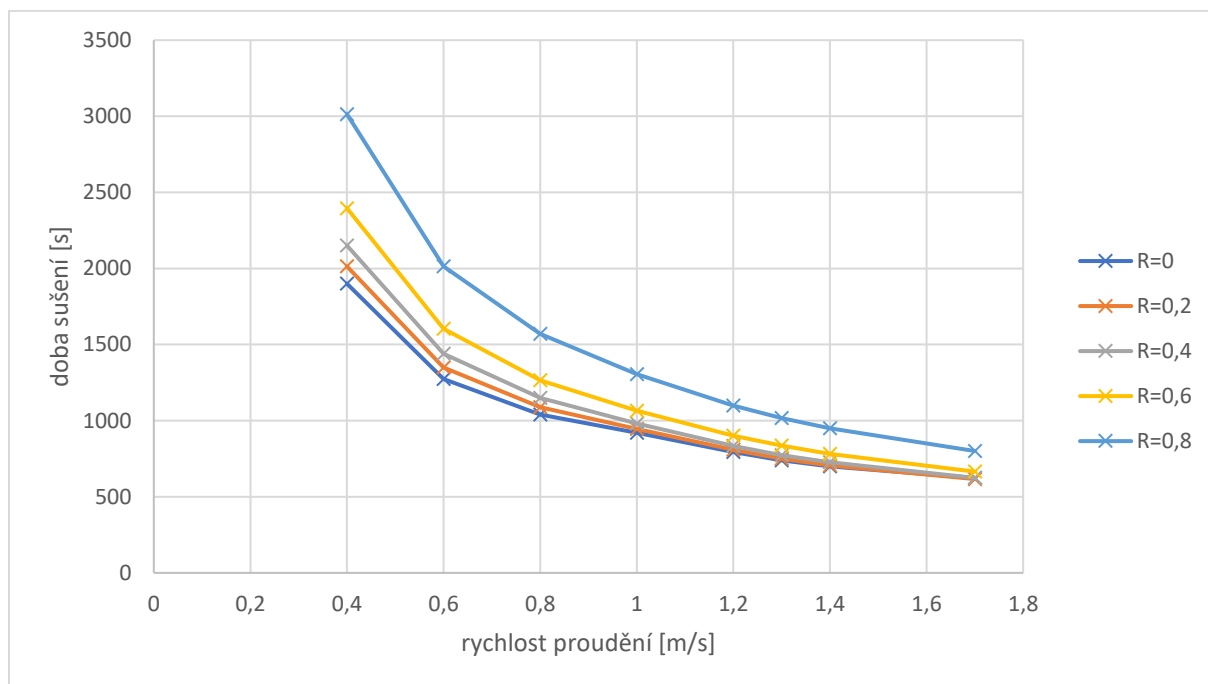
Pro tento výpočet byly použity experimentálně zjištěné součinitele přestupu tepla, které byly vyhodnoceny v kapitole 7.5.2. Tyto experimentálně zjištěné hodnoty byly zjištěny bez zapojení recirkulace vzduchu. Během tohoto výpočtu bylo uvažováno, že hodnota součinitele přestupu tepla se mění pouze s rychlostí sušicího vzduchu, a tím pádem užití recirkulace vzduchu v jakékoliv míře nemá vliv na hodnotu součinitele přestupu tepla.

Pro výpočet byl použit postup popsáný v kapitole 6. Užití recirkulace bylo uvažováno takovým způsobem, že recirkulační číslo nemělo vliv na průtok sušicího média a docházelo pouze ke změně teploty a relativní vlhkosti před ohříváčem vzduchu a za sušicí komorou. Výstupem výpočtu byla doba, za kterou se materiál vysuší na požadovaný koncový obsah vody, a také výstupní teplota ze sušárny společně s výstupní relativní vlhkostí vzduchu. Výpočet opět probíhal v MS Excel.

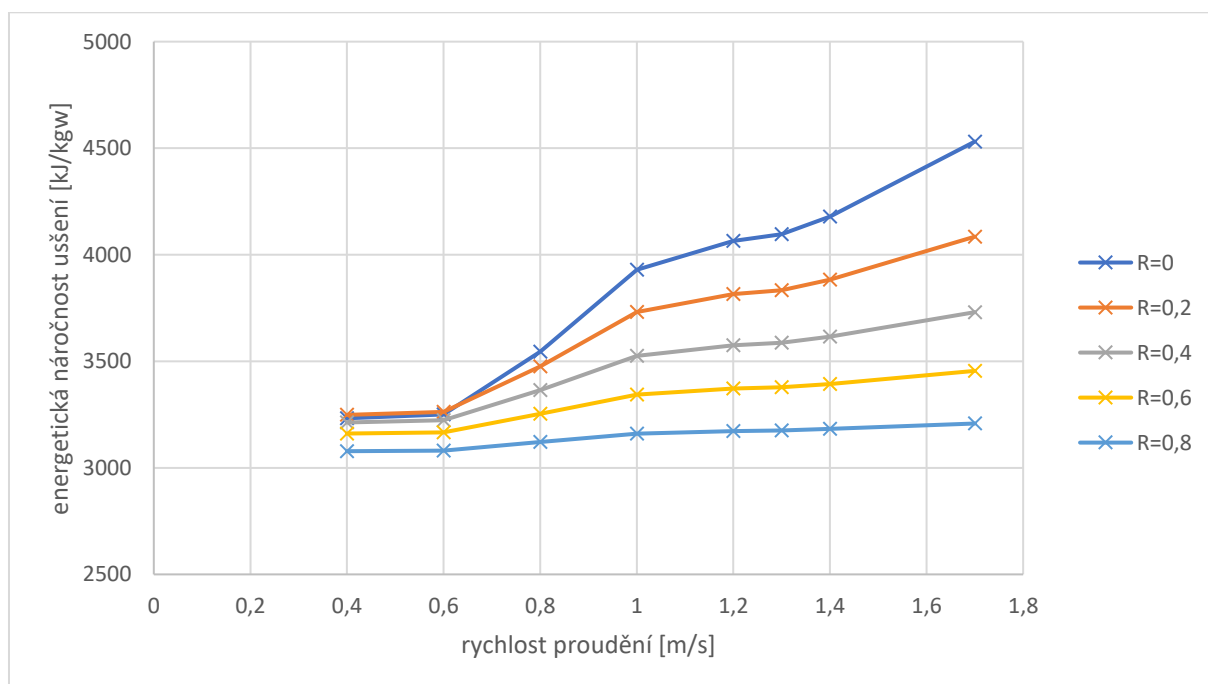
Tabulka 15: Volené hodnoty pro vyhodnocení vlivu rychlosti na dobu sušení

Průměr sušárny	1,2	<i>m</i>
Výška vrstvy materiálu	0,08	<i>m</i>
Teplota otopu	70	$^{\circ}\text{C}$
Sypná hmotnost	400	kg/m^3
Obsah vody – vstup	50	—

Obsah vody – výstup	20	–
Teplota okolí	20	°C
Relativní vlhkost okolí	50	%



Obrázek 46: Závislost doby sušení na rychlosti proudění a na recirkulačním čísle

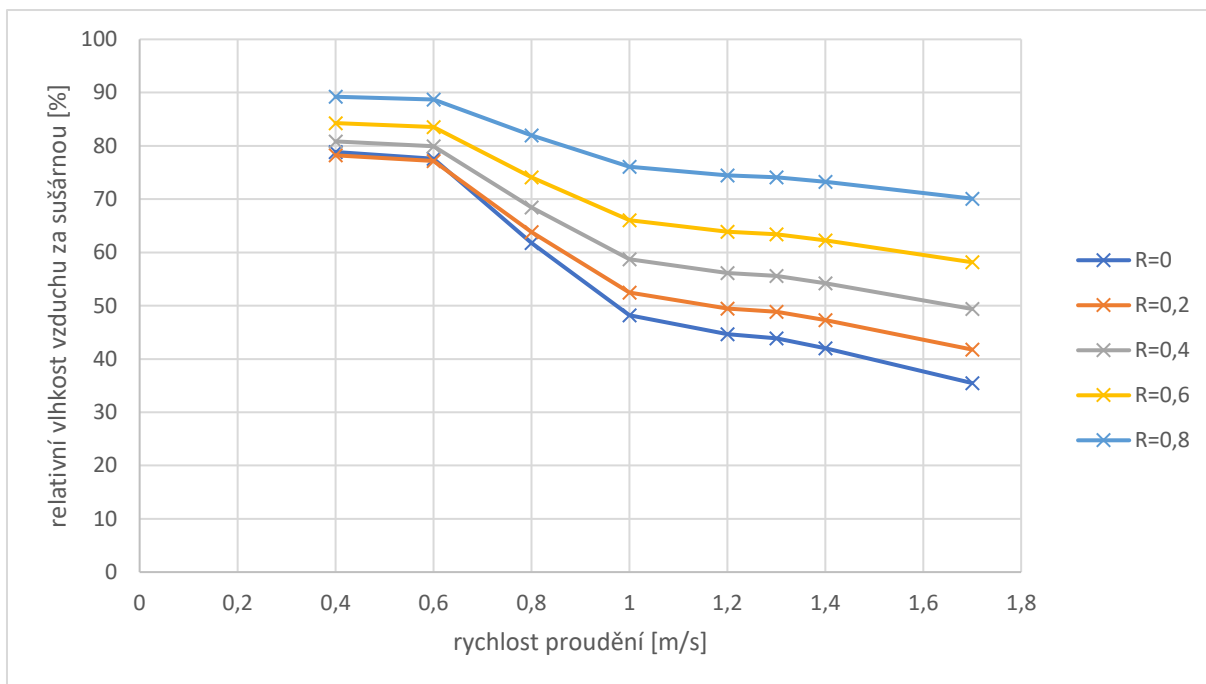


Obrázek 47: Závislost energetické náročnosti sušení na rychlosti a recirkulačním čísle

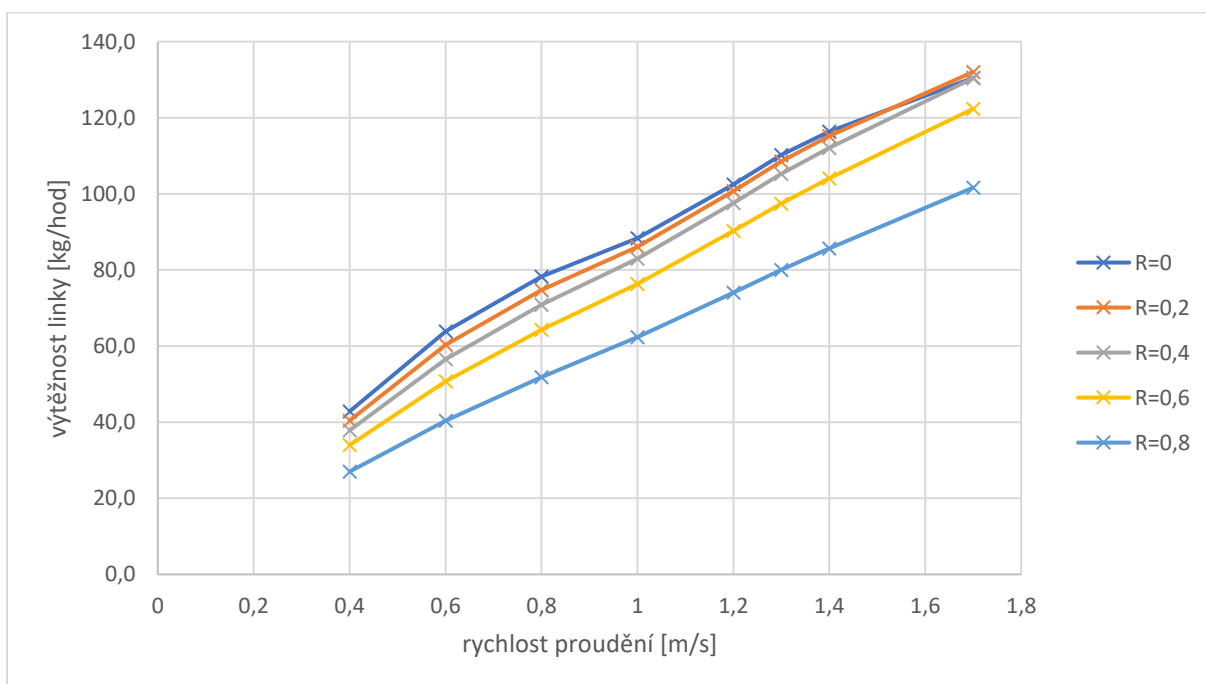
Na obrázku 46 je zobrazena závislost doby sušení na rychlosti proudění vzduchu a na recirkulačním čísle. Na obrázku 47 je zobrazena závislost energetické náročnosti sušení na rychlosti proudění vzduchu a recirkulačním čísle. Z grafů je patrné, že doba sušení se snižuje s rostoucí rychlostí sušicího média, ale roste se zvyšujícím se recirkulačním číslem. Materiál by se nejrychleji vysušil na požadovaný obsah vody při nejvyšší rychlosti sušicího média a bez použití recirkulace vzduchu, ale energetická náročnost sušení by dosahovala hodnoty okolo 4500 kJ/kg_w , což se nejeví jako příliš ekonomické, kdyby vzduch již nebyl dále využíván. Při použití jakékoliv míry recirkulace je patrné, že se energetická náročnost snižuje. Energetická náročnost se snižuje s rostoucím recirkulačním číslem. Nejmenší energetické náročnosti dosáhneme při použití recirkulačního čísla $R = 0,8$. Při použití tohoto recirkulačního čísla jen mírně roste energetická náročnost s rostoucí rychlostí sušicího média. Při použití recirkulačního čísla $R = 0,6$ a rychlosti proudění sušicího vzduchu $1,7 \text{ m/s}$ se čas sušení v porovnání se sušením bez použití recirkulace odchozího vzduchu zvýšil o 7 % na 665 s, ale energetická náročnost se snížila o 24 % na 3455 kJ/kg_w .

Se zvyšujícím se recirkulačním číslem a se snižující se rychlostí sušicího vzduchu roste relativní vlhkost vzduchu za sušárnou. Tato závislost je zobrazena na obrázku 48. Na obrázku 49 je zobrazena závislost výtěžnosti horkovzdušné sušárny na rychlosti proudění sušicího média a na recirkulačním čísle. Výtěžnost linky vyjadřuje hmotnost vysušeného materiálu na výstupu za jednu hodinu. S rostoucím recirkulačním číslem klesá výtěžnost linky. Při rychlosti proudění sušicího vzduchu $1,7 \text{ m/s}$ a recirkulačním čísle $R = 0,8$ by výtěžnost linky klesla o 22 % na 102 kg/hod s porovnáním výtěžnosti linky při rychlosti $1,7 \text{ m/s}$ a recirkulačním čísle $R = 0$. S rostoucí rychlostí proudění sušicího vzduchu lineárně stoupá výtěžnost linky. Z porovnání výtěžnosti linky při rychlostech proudění sušicího média $0,4 \text{ m/s}$ a $1,7 \text{ m/s}$ a recirkulačním čísle $R = 0$ stoupla výtěžnost linky z hodnoty 43 kg/hod o 305 % na 131 kg/hod .

Tlaková ztráta vrstvy roste se zvyšující se rychlostí sušicího média. Tato závislost je pro materiál A zobrazena na obrázku 41.



Obrázek 48: Závislost relativní vlhkosti vzduchu za sušárnou na rychlosti a recirkulačním čísle



Obrázek 49: Závislost výtěžnosti linky na rychlosti proudění a recirkulačním čísle

9 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo vyhodnocení vlivu rychlosti proudění sušicího média na rychlost sušení a provoz horkovzdušné sušárny. V prvních kapitolách byla zpracována rešeršní část na téma biomasa a byly uvedeny důvody, proč je vhodné snižovat obsah vody v biomase. V kapitole 163 byly popsány principy, metody sušení a sušárny byly rozděleny podle různých kritérií. Byly popsány a porovnány vybrané sušárny vhodné pro sušení biomasy. Poslední teoretická kapitola se zabývala procesem fluidního sušení, kde byla popsána fluidace a její výhody, které jsou pro sušení přínosné. Dále byly popsány různé druhy fluidních sušáren.

V další kapitole bylo cílem vytvořit bilanční model horkovzdušné sušárny bez i s použitím recirkulace sušicího média s cílem získat dobu sušení, průměr sušárny a výšku vrstvy materiálu. Určení objemové odpařivost a součinitele přestupu tepla, což jsou základní údaje nutné pro návrh sušárny, je složité. V odborné literatuře lze najít hodnoty objemových odpařivostí nebo pomocí kritériálních rovnic dopočítat součinitele přestupu tepla. Výsledky těchto výpočtů se pohybovaly v širokém rozsahu hodnot, což není pro analýzu vlivu rychlosti proudění sušicího média na rychlost sušení dostačující, a proto je tuto problematiku vhodné řešit experimentálně.

V experimentální části bylo provedeno měření v Ústavu energetiky Fakulty státní ČVUT na horkovzdušné sušárně. V několika kampaních bylo provedeno celkem 28 měření. Na začátku této části je popis měřicích zařízení a průběhu měření. V kapitole 7.2 je uveden seznam všech měření s podmínkami, při jakých sušení probíhalo. Každé měření bylo specifické svými parametry, kterými byly průtok sušicího média, nastavená teplota otopu, výška vrstvy materiálu, druh sušeného materiálu, užití recirkulace vzduchu a způsob urovnání vrstvy. Sušeným materiálem byla tříděná buková dřevní štěpka o třech frakcích. Prvních 7 měření se zabývalo vlivem změny parametrů sušení na rychlost sušení, přičemž průtok sušicího média byl zachován konstantní. Všechna zbývající měření byla zaměřena na vliv rychlosti proudění sušicího média na rychlost sušení. Tento vliv rychlosti byl zkoumán pro všechny tři frakce dřevní štěpky. Obsah vody na vstupu se pohyboval u všech vzorků na vstupu okolo 50 %. Obsah vody na výstupu se pohyboval od 2 % až po 10 %. Pro všechna sušení byly vyhodnoceny sušící křivky. Důležitými parametry sušení, které byly vyhodnocovány jsou hodnoty měrných objemových odpařivostí a hodnoty objemového součinitele přestupu tepla.

Objemový součinitel přestupu tepla se pohyboval v rozmezí od 11 do 40 $kW/m^3 \cdot K$ a měrná objemová odpařivost se pohybovala od 207 do 723 $kg/m^3 \cdot hod.$

Pro objektivní porovnání odpařivostí a součinitelů přestupu tepla při různých rychlostech byl zaveden střední objemový součinitel přestupu tepla a střední objemová odpařivost. Sušení při nízkém obsahu vody probíhalo velmi pomalu a při každém měření byl koncový obsah vody jiný, proto bylo uvažováno v případě nově založených veličin, že sušení probíhalo z obsahu vody 50 % na 20 %. Dle očekávání se střední součinitel přestupu tepla zvyšoval s rostoucí rychlostí sušicího vzduchu. Při rychlostech sušicího vzduchu okolo 1 m/s se u dvou drobnějších materiálů ve vrstvě vytvořili kanály, kterými proudilo více vzduchu než přes vrstvu materiálu, to mělo za následek určitý propad v hodnotách součinitele přestupu tepla. Nejvyššího součinitele přestupu tepla 72 $kW/m^3 \cdot K$ bylo dosaženo při rychlosti sušicího vzduchu 1,7 m/s u střední frakce materiálu. Je také patrné, že velikost částic materiálu má významný vliv na hodnotu součinitele přestupu tepla. S rostoucí rychlostí sušicího vzduchu také roste střední objemová odpařivost. Zde však není patrný propad hodnot v okolí rychlosti proudění 1 m/s . Při rychlostech proudění sušicího vzduchu 0,4 m/s byla střední objemová odpařivost u všech frakcí materiálu podobná a to 220 $kg/m^3 \cdot hod.$ Se zvyšující se rychlostí sušicího vzduchu měla velikost částic stále větší vliv na hodnotu střední objemové odpařivosti. Ta dosahovala nejvyšší hodnoty 960 $kg/m^3 \cdot hod$ při rychlosti 1,7 m/s . Dále byla vyhodnocena energetická náročnost sušení, která se zvyšuje s rostoucí rychlostí proudění sušicího vzduchu a také roste s velikostí částic. Pohybovala se v rozmezí 3300 a 5050 kJ/kg_w . Experimentálně určené údaje součinitele přestupu tepla byly porovnány s teoreticky získanými hodnotami na obrázku 45.

V závěrečné kapitole byl opět zkoumán vliv rychlosti proudění sušicího vzduchu na rychlost sušení. Pro sušárnu o průměru 1,2 m , pro výšku materiálu 0,08 m a pro teplotu otopu 70 $^{\circ}C$ byl zjištěn čas sušení v závislosti na rychlosti proudění sušicího média a na užití recirkulace vzduchu. Z experimentální části byly převzaty střední objemové součinitele přestupu tepla a nebyly uvažovány tepelné ztráty sušárny do okolí. Z výsledků vyplývá, že k nejrychlejšímu sušení bude docházet při použití nejvyšší rychlosti 1,7 m/s a bez použití recirkulace vzduchu. Doba sušení z obsahu vody 50 na 20 % by byla 624 s. V tomto případě měl vzduch za sušárnu stále vysokou teplotu a relativní vlhkost okolo 35 %, tím pádem byla energetická náročnost sušení velmi vysoká a to okolo 4600 kJ/kg_w . Při užití jakékoliv míry recirkulace vzduchu byl sice čas sušení delší, ale vzduch na výstupu se více vychladil a měl vyšší relativní vlhkost. Při použití recirkulačního čísla $R = 0,6$ a rychlosti proudění sušicího

vzduchu $1,7 \text{ m/s}$ se čas sušení v porovnání se sušením při bez recirkulace odchozího vzduchu zvýšil o 7 % na 665 s, ale energetická náročnost se snížila o 24 % na 3455 kJ/kg_w . Relativní vlhkost v tomto případě dosahovala 58 %. Dále byla vyhodnocena výtěžnost linky neboli kolik materiálu na výstupu se vysušilo za jednu hodinu. Nejvyšší výtěžnosti bylo dosaženo při rychlosti proudění sušícího vzduchu $1,7 \text{ m/s}$ a bez použití recirkulace vzduchu a to 131 kg/hod . Při stejné rychlosti ale s použitím recirkulačního čísla $R = 0,6$ by se výtěžnost snížila o 6 % na 122 kg/hod .

10 Seznam obrázků

Obrázek 1: Závislost výhřevnosti a spalného tepla na vlhkosti paliva [4].....	13
Obrázek 2: Závislost účinnosti kotle na vlhkosti paliva [4].....	14
Obrázek 3: Závislost objemu spalin na vlhkosti paliva [4].....	14
Obrázek 4: Závislost rovnovážné vlhkosti materiálu na relativní vlhkosti vzduchu [6].....	16
Obrázek 5: Sušicí křivka a průběh teplot při různých fázích konvektivního sušení [6]	18
Obrázek 6: Schéma statiky konvektivního sušení [6]	19
Obrázek 7: Sušicí křivka [9].....	22
Obrázek 8: Pásová sušárna [10]	26
Obrázek 9: Ofukovaná pásová sušárna [10].....	27
Obrázek 10: Bubnová sušárna [10]	28
Obrázek 11: Vestavby používané v bubnových sušárnách [11].....	28
Obrázek 12: Proudová sušárna [10]	29
Obrázek 13: Disková sušárna [10]	29
Obrázek 14: Fluidní sušárna [10]	30
Obrázek 15: Závislost tlakové ztráty fluidní vrstvy na rychlosti proudění [14]	33
Obrázek 16: Typy fluidních vrstev [15].....	35
Obrázek 17: Geldartův diagram [15].....	36
Obrázek 18: Dávková fluidní sušárna [8]	41
Obrázek 19: Semikontinuální fluidní sušárna [8]	41
Obrázek 20: Kontinuální fluidní sušárna [8].....	42
Obrázek 21: Fluidní sušárna s pístovým tokem [8].....	42
Obrázek 22: Schéma statiky fluidní sušárny	46
Obrázek 23: Schéma statiky fluidní sušárny s recirkulací odchozího vzduchu	49
Obrázek 24: Měřicí stanice	58
Obrázek 25: Ovládací panel fluidní sušárny	58

Obrázek 26: Fluidní sušárna.....	58
Obrázek 27: Reprezentativní částice materiálu A	61
Obrázek 28: Porovnání suché a mokré biomasy – materiál A	61
Obrázek 29: Porovnání suché a mokré biomasy – materiál B	61
Obrázek 30: Porovnání suché a mokré biomasy – materiál C	61
Obrázek 31: Sušicí křivka – měření IX.....	68
Obrázek 32: Rychlost sušení – měření IX.....	68
Obrázek 33: Sušicí křivky – měření I-V a VII.....	69
Obrázek 34: Sušicí křivky – měření VIII – XV materiál A	70
Obrázek 35: Sušicí křivky – měření XVI – XXIII materiál B.....	71
Obrázek 36: Sušicí křivky – měření XXIV – XXVIII materiál C.....	71
Obrázek 37: Ukázka sušení při malém průtoku vzduchu pro materiál C.....	73
Obrázek 38: Závislost rychlosti sušení na obsahu vody – materiál A.....	74
Obrázek 39: Závislost rychlosti sušení na obsahu vody – materiál B.....	74
Obrázek 40: Závislost rychlosti sušení na obsahu vody – materiál C.....	75
Obrázek 41: Závislost tlakové ztráty vrstvy materiálu na rychlosti proudění vzduchu	75
Obrázek 42: Závislost středního objemové součinitele přestupu tepla na rychlosti proudění .	79
Obrázek 43: Závislost střední objemové odpařivosti na rychlosti proudění	80
Obrázek 44: Závislost energetické efektivity na rychlosti proudění	81
Obrázek 45: Závislost objemového součinitele přestupu tepla na rychlosti proudění vzduchu mezi teoreticky vypočtenými a naměřenými hodnotami	82
Obrázek 46: Závislost doby sušení na rychlosti proudění a na recirkulačním čísle	84
Obrázek 47: Závislost energetické náročnosti sušení na rychlosti a recirkulačním čísle	84
Obrázek 48: Závislost relativní vlhkosti vzduchu za sušárnou na rychlosti a recirkulačním čísle	86
Obrázek 49: Závislost výtěžnosti linky na rychlosti proudění a recirkulačním čísle.....	86

11 Seznam tabulek

Tabulka 1: Porovnání sušáren	31
Tabulka 2: Okrajové podmínky pro výpočet.....	43
Tabulka 3: Volené hodnoty pro výpočet	44
Tabulka 4: Hodnoty okolního prostředí pro výpočet	44
Tabulka 5: Přehled hodnoty vzduchu pro sušení bez recirkulace	46
Tabulka 6: Hodnoty vzduchu při sušení.....	49
Tabulka 7: Přehled hodnoty vzduchu pro sušení s recirkulací.....	51
Tabulka 8: Fluidní charakteristiky – materiál A.....	59
Tabulka 9: Fluidní charakteristiky – materiál B.....	60
Tabulka 10: Fluidní charakteristiky – materiál C.....	60
Tabulka 11: Parametry jednotlivých sušení	63
Tabulka 12: Zaznamenávané hodnoty pro měření IX	65
Tabulka 13: Bilanční výpočty – měření IX	66
Tabulka 14: Vyhodnocení experimentů	77
Tabulka 15: Volené hodnoty pro vyhodnocení vlivu rychlosti na dobu sušení	83

12 Seznam literatury

- [1] Jan Hrdlička, „Biomasa, 1. a 2. přednáška", Praha, 2022.
- [2] „Vše, co jste chtěli vědět o biomase | KADRIA". <https://kadria-kotle.cz/co-je-biomasa/> (viděno 28. srpen 2023).
- [3] Tomáš Dlouhý, „Spalování a kotle, 1. přednáška", Praha, 2022.
- [4] Jan Havlík, „Sušení biomasy – přednáška", Praha, 2022.
- [5] S. J. Kowalski, *Thermomechanics of Drying Processes*, roč. 8. in Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, vol. 8. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003. doi: 10.1007/978-3-540-36405-4.
- [6] Gulnara Grdzeliwili, „SUŠENÍ ROSTLINNÝCH MATERIÁL".
- [7] Jiří Petrák a Rudolf Žitný, *Tepelné pochody II*. 1997.
- [8] A. S. Mujumdar, „Handbook of Industrial Drying", 2006.
- [9] Oldřich Holeček, „Sušení", 2014.
- [10] M. Verma, C. Loha, A. N. Sinha, a P. K. Chatterjee, „Drying of biomass for utilising in co-firing with coal and its impact on environment – A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, roč. 71, s. 732–741, kvě. 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2016.12.101.
- [11] Dalimil Šnita a kolektiv, *Chemické inženýrství I*. Praha, 2006.
- [12] D. Kunii a O. Levenspiel, „Fluidization Engineering", s. 491, 1991.
- [13] W.-C. Yang, Ed., *Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems*. CRC Press, 2003. doi: 10.1201/9780203912744.
- [14] „Fluidace Úvod: Úkol: Teoretický úvod". <https://docplayer.cz/71703-Fluidace-uvod-ukol-teoreticky-uvod.html> (viděno 28. srpen 2023).
- [15] D. Kunii, 国井大蔵, a Octave. Levenspiel, *Fluidization engineering*. Butterworth-Heinemann, 1991.
- [16] J. Halík, T. Dlouhý, a P. Hýbek, „Fluidní sušení biomasy".

- [17] T. Poós a V. Szabó, „Volumetric Heat Transfer Coefficient in Fluidized-Bed Dryers”, *Chem Eng Technol*, roč. 41, č. 3, s. 628–636, bře. 2018, doi: 10.1002/CEAT.201700038.