

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY

**VÝROBA A ZPRACOVÁNÍ NANOPRÁŠKŮ PRO
POTRAVINÁŘSKÝ PRŮMYSL**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2022

MATOUŠ BERAN

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Beran** Jméno: **Matouš** Osobní číslo: **491250**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Výroba a zpracování nanoprášek pro potravinářský průmysl

Název bakalářské práce anglicky:

Production of nano-particles for food industry

Pokyny pro vypracování:

Nanoprášky poskytují díky svým nanorozměrům zcela nové fyzikálně chemické vlastnosti. Tyto vlastnosti lze využít také v potravinářském průmyslu pro výrobu nových produktů, či produktů s jedinečnými senzorickými vlastnostmi. Samotná technologie výroby a následné zpracování či nakládání s nanoprášky vyžaduje specifické podmínky. V rámci bakalářské práce zpracujte především:

- 1) Literární rešerši zaměřenou na výrobu a zpracování nanoprášek.
- 2) Porovnejte nalezené technologie a posuďte, zda jsou použitelné pro potravinářský či farmaceutický průmysl.
- 3) Proveďte ideový návrh zařízení pro výrobu nanoprášek vybranou technologií.
- 4) Proveďte ověřovací experimenty na laboratorním zařízení a výsledky uveďte v praktické části bakalářské práce.

Seznam doporučené literatury:

SINGH, Trepti, Shruti SHUKLA, Pradeep KUMAR, Verinder WAHLA, Vivek K. BAJPAI a Irfan A. RATHER. Application of Nanotechnology in Food Science: Perception and Overview. *Frontiers in Microbiology* [online]. 2017, 8 [cit. 2022-04-13]. ISSN 1664-302X. Dostupné z: doi:10.3389/fmicb.2017.01501
ANANDHARAMAKRISHNAN, C. a S. PARTHASARATHI, ed. *Food nanotechnology: principles and applications*. Boca Raton: CRC Press, [2019]. Contemporary food engineering. ISBN 9781498767170.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

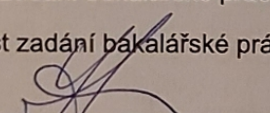
doc. Ing. Jan Skočilas, Ph.D. ústav procesní a zpracovatelské techniky FS

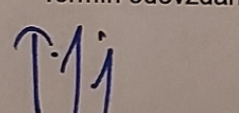
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

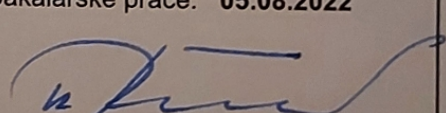
Datum zadání bakalářské práce: **20.04.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **05.08.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **18.09.2022**


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

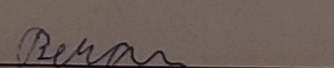

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

28-04-2022
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

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

V Praze dne

.....
Jméno a Příjmení

Chtěl bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Janu Skočilasovi, Ph.D. za jeho ochotu a pomoc při zpracovávání této bakalářské práce. V průběhu této spolupráce jsem se od něj naučil mnoho užitečných vědomostí.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině za jejich nekonečnou podporu při studiu.

Anotační list

Jméno autora: Matouš

Příjmení autora: Beran

Název práce česky: Výroba a zpracování nanoprášků pro potravinářský průmysl

Název práce anglicky: Production of nano-particles for food industry

Rozsah práce: počet stran: 53

počet obrázků: 18

počet tabulek: 18

počet příloh: 0

Akademický rok: 2021/2022

Jazyk práce: Čeština

Ústav: Ústav procesní a zpracovatelské techniky

Studijní program: Teoretický základ strojího inženýrství

Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Skočilas, Ph.D.

Konzultant práce:

Zadavatel: doc. Ing. Jan Skočilas, Ph.D.

Abstrakt: Tato práce se zaměřuje na výrobu nanoprášků a jejich využití v potravinářském průmyslu. Jsou zde popsány způsoby výroby nanoprášků a jejich možné použití v potravinářském, či farmaceutickém průmyslu. Druhá část je zaměřena na ideový návrh rozprašovací sušárny a na experimentech na již postavené rozprašovací sušárně s nebulizační hlavou. Experimenty jsou výpočetně ověřeny.

Abstract: This thesis focuses on the production of nanoparticles and their use in the food industry. The production of nanoparticles and their possible use in the food or pharmaceutical industry is described. The second part of this thesis focuses on the preliminary desing of a spray dryer and experiments on an already built spray dryer with a nebulisation head. The experiments are computationally verified.

Klíčová slova: nanotechnologie, nanoprášek, nanočástice, potravinářský průmysl, sušárna, rozprašovací sušárna, nebulizace

Klíčová slova anglicky: nanotechnology, nanopowder, nanoparticles, food industry, dryer, spray dryer, nebulisation

Využití: Pokusy na nebulizační rozprašovací sušárně pro změření vlastností sušárny a její možné využití pro výrobu nanoprášku.

Seznam použitých veličin

| | | |
|-------------------|---|--------------------------------|
| A | Konstanta specifická pro danou látku | — |
| B | Konstanta specifická pro danou látku | — |
| C | Konstanta specifická pro danou látku | — |
| c_{p45} | Měrná tepelná kapacita vzduchu ve 45 °C | $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ |
| c_{p84} | Měrná tepelná kapacita vzduchu ve 84 °C | $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ |
| c_{pzv} | Zvolená měrná tepelná kapacita | $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ |
| D_s | Průměr sušící komory | m |
| D_v | Difuzní součinitel vodní páry ve vzduchu | $m^2 \cdot s^{-1}$ |
| dh | Rozdíl entalpií | $J \cdot kg^{-1}$ |
| dx | Rozdíl vlhkosti vzduchu | $kg \cdot kg^{-1}$ |
| K | Počet kuliček | — |
| M | Molární hmotnost vody | $kg \cdot mol^{-1}$ |
| \dot{m}_1 | Hmotnostní průtok ohřátého vzduchu do sušárny | $kg \cdot s^{-1}$ |
| \dot{m}_{1h2op} | Hmotnostní průtok vody ve vzduchu vstupujícím do sušárny | $kg \cdot s^{-1}$ |
| \dot{m}_{1p} | Hmotnostní průtok produkce prášku | $kg \cdot s^{-1}$ |
| \dot{m}_{1sv} | Hmotnostní průtok vstupujícího suchého vzduchu do sušárny | $kg \cdot s^{-1}$ |
| \dot{m}_2 | Hmotnostní průtok vody do sušárny | $kg \cdot s^{-1}$ |
| \dot{m}_{2h2op} | Hmotnostní průtok vody vstupující do sušárny | $kg \cdot s^{-1}$ |
| \dot{m}_3 | Hmotnostní průtok vzduchových nožů | $kg \cdot s^{-1}$ |
| \dot{m}_{3sv} | Hmotnostní průtok suchého vzduchu vzduchovými noži | $kg \cdot s^{-1}$ |
| \dot{m}_4 | Hmotnostní průtok vystupujícího vzduchu ze sušárny | $kg \cdot s^{-1}$ |
| \dot{m}_{4h2ok} | Hmotnostní průtok vystupující vody | $kg \cdot s^{-1}$ |
| \dot{m}_{4h2op} | Hmotnostní průtok vystupující vody ve vzduchu | $kg \cdot s^{-1}$ |
| \dot{m}_{4sv} | Hmotnostní průtok vystupujícího suchého vzduchu | $kg \cdot s^{-1}$ |
| \dot{m}_A | Hmotnostní průtok vzduchu pro odpaření vody | $kg \cdot s^{-1}$ |
| \dot{m}_{A1} | Hmotnostní průtok vzduchu na vstupu | $kg \cdot s^{-1}$ |
| \dot{m}_{A2} | Hmotnostní průtok vzduchu na výstupu | $kg \cdot s^{-1}$ |
| \dot{m}_{feed} | Hmotnostní průtok kapaliny vstupující do sušárny | $kg \cdot s^{-1}$ |
| \dot{m}_N | Hmotnostní průtok vzduchových nožů | $kg \cdot s^{-1}$ |
| \dot{m}_p | Hmotnostní průtok vyprodukované sušiny | $kg \cdot s^{-1}$ |
| \dot{m}_s | Hmotnostní průtok suspenze na vstupu | $kg \cdot s^{-1}$ |
| \dot{m}_w | Hmotnostní průtok odpařené vody | $kg \cdot s^{-1}$ |
| \dot{m}_{w1} | Hmotnostní průtok odpařené vody | $kg \cdot s^{-1}$ |
| \dot{m}_{w2} | Hmotnostní průtok zbytkové vody v produktu | $kg \cdot s^{-1}$ |
| p_∞ | Tlak okolí | Pa |
| p_{Atm} | Atmosférický tlak | Pa |
| p_s | Tlak nasycených par | Pa |
| \dot{Q} | Tepelný výkon dodaný soustavě | W |
| \dot{Q}_L | Výkon k odpaření vody | W |

| | | |
|----------------|---|---------------------------------|
| $Q_{výp}$ | Výparné teplo vody | $J \cdot kg^{-1}$ |
| \dot{Q}_z | Ztrátový výkon | W |
| R | Poloměr kapičky v určitém čase | m |
| r_k | Poloměr kuličky | m |
| R_M | Molární plynová konstanta | $J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$ |
| r_s | Poloměr sušící komory | m |
| $R_{s,0}$ | Poloměr kapička v čase $t = 0$ | m |
| RH | Vlhkost naměřená vlhkostní sondou | % |
| RH_{Amb} | Vlhkost okolí | % |
| S_c | Celkový povrch kuliček | m^2 |
| S_k | Povrch kuličky | m^2 |
| S_s | Plocha sušící komory | m^2 |
| T | Teplota | $^{\circ}C$ |
| t | Čas | s |
| \bar{t} | Střední doba zdržení | s |
| T_1 | Teplota na sondě 1 | $^{\circ}C$ |
| T_2 | Teplota na sondě 2 | $^{\circ}C$ |
| T_3 | Teplota na sondě 3 | $^{\circ}C$ |
| T_4 | Teplota na sondě 4 | $^{\circ}C$ |
| T_{Atm} | Teplota okolí | $^{\circ}C$ |
| T_N | Teplota vzduchových nožů | $^{\circ}C$ |
| u | Střední rychlost | $m \cdot s^{-1}$ |
| V | Objem soustavy | m^3 |
| \dot{V} | Objemový průtok vzduchu | $m^3 \cdot s^{-1}$ |
| \dot{V}_1 | Objemový průtok vystupujícího vzduchu | $m^3 \cdot s^{-1}$ |
| V_k | Objem kuličky | m^3 |
| v_N | Navržená výška sušící komory | m |
| v_s | Výška sušící komory | m |
| V_s | Objem sušící komory | m^3 |
| \dot{V}_{VN} | Objemový průtok vzduchových nožů | $m^3 \cdot s^{-1}$ |
| X_0 | Počáteční vlhkost prášku | % |
| X_1 | Konečná vlhkost prášku | % |
| x_{in} | Měrná vlhkost na vstupu | % |
| x_{out} | Měrná vlhkost na výstupu | % |
| ρ_{24} | Hustota vzduchu při $24^{\circ}C$ | $kg \cdot m^{-3}$ |
| ρ_{45} | Hustota vzduchu při $45^{\circ}C$ | $kg \cdot m^{-3}$ |
| ρ_{80} | Hustota vzduchu při $80^{\circ}C$ | $kg \cdot m^{-3}$ |
| ρ_{A60} | Hustota suchého vzduchu při $60^{\circ}C$ | $kg \cdot m^{-3}$ |
| ρ_L | Hustota vody | $kg \cdot m^{-3}$ |

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Seznam použitých veličin | 7 |
| 1. Úvod | 11 |
| První část – literární rešerše | 12 |
| 2. Nanoprášek..... | 12 |
| 3. Výroba nanoprášků | 14 |
| 3.1 Fyzikální metody..... | 14 |
| 3.1.1 Mletí..... | 14 |
| 3.1.2 Superkritické kapaliny..... | 14 |
| 3.1.3 Rotující disk | 15 |
| 3.1.4 Kondenzace inertních plynů..... | 15 |
| 3.1.5 Vysokotlaká homogenizace..... | 16 |
| 3.1.6 Elektronástržik..... | 16 |
| 3.1.7 Rozprašovací sušárna..... | 17 |
| 3.2 Chemické metody..... | 17 |
| 3.2.1 Metoda sol-gel | 17 |
| 3.2.2 Syntéza polyolů | 17 |
| 3.2.3 Tepelné rozložení..... | 18 |
| 3.3 Biologické metody | 18 |
| 3.3.1 Metoda polysacharidů | 18 |
| 3.3.2 Využití rostlin pro výrobu nanoprášků..... | 18 |
| 3.3.3 Využití mikroorganismů pro výrobu nanoprášků | 18 |
| 3.4 Vhodné metody výroby pro potravinářský a farmaceutický průmysl..... | 19 |
| 4. Separace nanočástic | 20 |
| 4.1 Filtry..... | 20 |
| 4.2 Elektrostatická precipitace | 20 |
| 5. Využití nanoprášků v potravinářském průmyslu | 21 |
| 5.1 Chuť a vzhled potravin..... | 21 |
| 5.2 Ochrana labilních sloučenin..... | 21 |
| 5.3 Funkční nanoprášky pro stabilizování emulzí a pěn..... | 22 |
| 5.4 Dodání bioaktivních složek | 22 |
| 5.5 Obaly potravin a jedlé povlaky | 23 |
| 6. Závěr..... | 24 |
| Druhá část – praktická část | 25 |
| 7. Ideový návrh rozprašovací sušárny | 25 |
| 7.1 Schéma navržené sušárny | 25 |

| | | |
|-------|--|-----------|
| 7.2 | Hmotová bilance sušárny | 27 |
| 7.3 | Výpočet rozměrů sušící komory | 29 |
| 7.4 | Závěr ideového návrhu..... | 33 |
| 8. | Experimenty na laboratorním zařízení | 34 |
| 8.1 | Popis nebulizační sušárny | 34 |
| 8.2 | Průtok vzduchu | 37 |
| 8.2.1 | Data z předešlých měření | 37 |
| 8.2.2 | Ověření průtoku vzduchu | 38 |
| 8.3 | Měření průtoku vody..... | 39 |
| 8.4 | Test sušení vody na sušícím zařízení | 41 |
| 9. | Ověřovací výpočty | 45 |
| 9.1 | Ověření vlhkosti..... | 45 |
| 9.2 | Tepelná bilance..... | 48 |
| 9.2.1 | Zpřesnění teplotní bilance | 49 |
| 10. | Závěr | 51 |
| | Seznam použité literatury | 52 |

1. Úvod

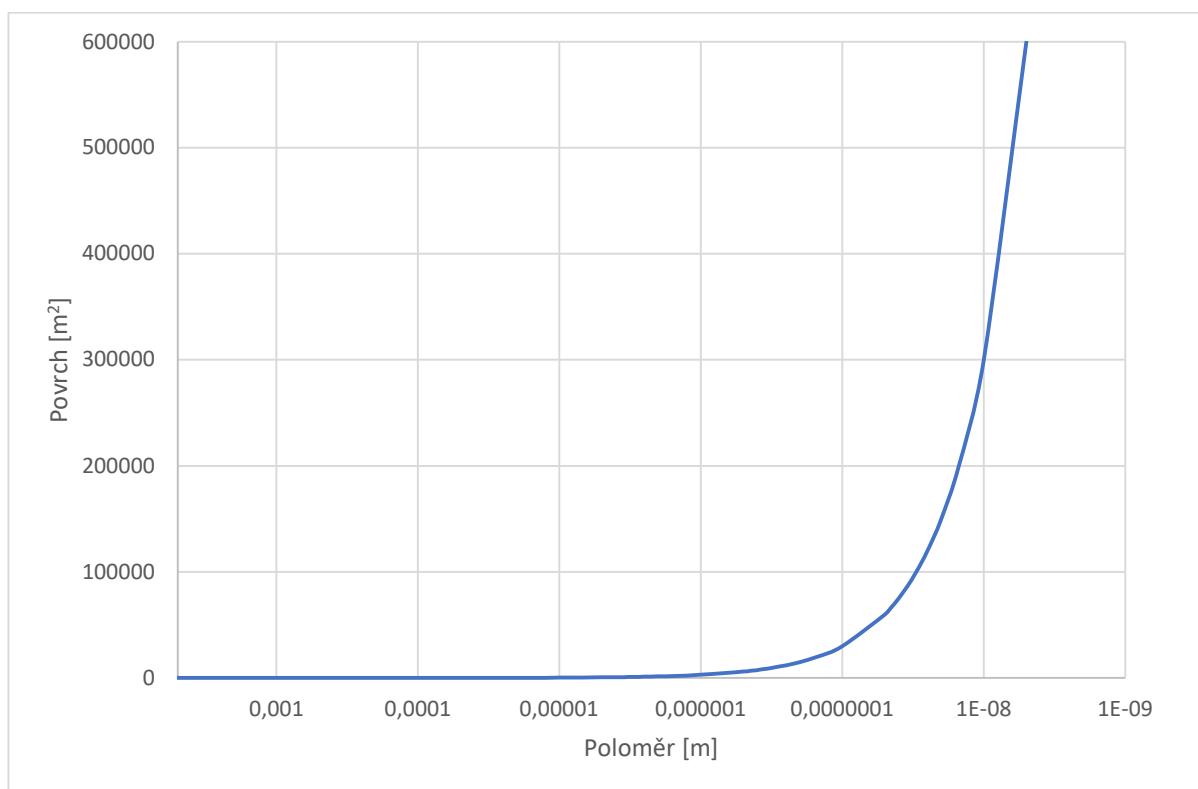
Nanotechnologie obecně je progresivní obor, který přináší nová zjištění, materiály a inovace. Nanoprášky nacházejí významné uplatnění v elektronice, kosmetice, zemědělství a povlakování, kde zlepšují vlastnosti povrchů. Nanoprášky pronikají i do potravinářského a farmaceutického průmyslu, kde také přinášejí nové nebo vylepšené vlastnosti, či umožňují dosud nemožné aplikace. Zároveň s sebou nesou výzvy, které je třeba překonat a vyřešit, jako je například jejich transport, manipulace, či separace z nosného média.

Tato práce se zabývá technologiemi výroby nanoprášku užitečných v potravinářském průmyslu. Na základě rešerše je vybrána jedna technologie, pro kterou je navrženo zařízení. Pro toto zařízení je vypracován bilanční model. Ten je použit pro vyhodnocení experimentů provedených na reálném zařízení.

První část – literární řešerše

2. Nanoprášek

Nanoprášek je materiál, ve kterém jeho jednotlivé částice mají rozměr v řádech nanometrů, to znamená 10^{-9} m. Na rozdíl od stejných materiálů s částicemi o velkých rozměrech mají částice s nanometrovými rozměry paradoxně mnohem větší povrch, který zajišťuje větší difuzní tok. Díky jejich povrchu mají nanočástice jedinečné vlastnosti, které se mohou lišit od materiálů s většími částicemi. Chování nanočástic je silně ovlivněno povrchovými vlastnostmi. V obr. č. 1 je zobrazena závislost povrchu nanočástic pro konstantní objem soustavy, pro zjednodušení v grafu pracuji s dokonalými kuličkami. [1]



Obr. č. 1 – závislost povrchu koulí na jejich poloměru pro konstantní objem soustavy 1 dm^3

Pro představu zde uvedu jednoduchý výpočet pro kuličky s poloměrem $r_k = 50 \text{ nm}$ vyrobené z $V = 1 \text{ dm}^3$ materiálu.

$$V_k = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_k^3 = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (50 \cdot 10^{-9})^3 = 5,24 \cdot 10^{-22} \text{ m}^3 \quad (1.1)$$

Pro počet kuliček K jsem musel vydělit celkový objem V objemem jedné kuličky V_k . Tento výpočet je zjednodušen a uvažuje i necelé kuličky.

$$K = \frac{V}{V_k} = \frac{0,001}{5,24 \cdot 10^{-22}} = 1,91 \cdot 10^{18} \text{ kuliček} \quad (1.2)$$

Dále jsem zjistil povrch jedné kuličky S_k , kterým jsem následně vynásobil počet kuliček K , abych zjistil celkový povrch kuliček S_c .

$$S_k = 4 \cdot \pi \cdot r_k^2 = 4 \cdot \pi \cdot (50 \cdot 10^{-9})^2 = 3,14 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2 \quad (1.3)$$

$$S_c = S_k \cdot K = 3,14 \cdot 10^{-14} \cdot 1,91 \cdot 10^{18} = 59\,974 \text{ m}^2 \quad (1.4)$$

Nanoprášek o poloměru $r = 50 \text{ nm}$ vytvořený z 1 dm^3 by měl výsledný povrch $S_c = 59974 \text{ m}^2$, což je obrovské číslo, díky kterému mohou mít nanočástice tak velký difuzní tok. Pro srovnání prášek s poloměrem $r = 50 \mu\text{m}$ by měl celkový povrch pouhých $59,97 \text{ m}^2$.

3. Výroba nanoprášků

Pro výrobu nanoprášků existují 2 základní způsoby výroby, jedná se o takzvané „top-down“ a „bottom-up“ metody. U top-down metod se části materiálu rozměňují, aby dosáhly požadované velikosti. Naopak takzvané bottom-up metody, jak již jméno naznačuje, fungují tak, že se nanoprášek staví z atomů, či molekul.

V této práci jsem rozdělil výrobu nanoprášků mezi 3 hlavní způsoby výroby – fyzikální, chemické a biologické způsoby.

3.1 Fyzikální metody

Fyzikální metody využívají především top-down způsob výroby. Jedná se o procesy, které využívají mechanickou nebo elektrickou energii k rozmělnění velkých částí na malé částičky s nanometrovými rozměry. Mezi tyto metody se řadí například mletí, superkritické kapaliny, rotující disk a další.

3.1.1 Mletí

Jedná se o jednu z jednodušších metod způsobu výroby nanoprášků, avšak je to všestranný způsob výroby, proto se využívá pro mletí mnoha různých materiálů. Mezi zařízení pro výrobu nanočástic mletím se řadí kulový mlýn a nárazový mlýn.

Kulový mlýn funguje na jednoduchém principu, kdy se do rotující nádoby vloží kuličky, společně s materiálem zamýšleným k rozmělnění. Při rotaci nádoby kuličky narážejí do zpracovávaného materiálu a třou se o sebe, a tak postupně rozměňují strukturu materiálu. Pomocí těchto nárazů se postupně materiál rozmělní na nanočástice. Nanočástice většinou mívají rozměry jedné tisíciný velikosti kuliček. [2] Kuličky využívané pro výrobu nanoprášků jsou většinou vyrobené z oceli, skla nebo keramiky. Nevýhodou této metody je výroba nepravidelných tvarů. [3]

Nárazový mlýn, podobně jako kulový mlýn, využívá nárazu k zmenšení velikosti částic, ale v tomto případě částice narážejí do sebe bez přítomnosti kuliček. [4]

Mletí se využívá v potravinářském průmyslu. Pomocí této metody se vyrobil nanoprášek např. z kukuřičného škrobu o velikosti 100 nm. [3]

3.1.2 Superkritické kapaliny

Jedná se o metodu, která využívá kapalin v superkritickém stavu. „*Kapalina v superkritickém stavu se může chovat jako kapalina nebo plyn, ale ve skutečnosti není ani jedno.*“ [5] Výhodou kapalin v superkritickém stavu je jejich schopnost v sobě rozpustit směs. Plyn v normálním stavu schopnost v sobě rozpustit složky dané látky nemusí mít vůbec, avšak v superkritickém stavu tuto schopnost má.

Nejčastěji se využívá CO₂, protože je levný, dostupný, snadno se dostane do superkritického stavu (31,3 °C; 7,4 MPa [5]), je inertní a po procesu výroby za sebou nezanechává žádné stopy. Nanoprášek je vyroben tak, že materiál určený pro výrobu nanoprášku je smíchán s CO₂ v superkritickém stavu. Tato směs je následně vypuštěna tryskou do nádoby s atmosférickým tlakem, kde CO₂ rychle expanduje, vypaří se a rychlou expanzí roztrhá materiál na rozměry nanometrů. [5]

Pomocí rychle expandujících superkritických kapalin se podařilo zapouzdřit vitamín B2 v nanočásticích lipidů. Tyto nanočástice měli rozměry okolo 150 nm. [6]

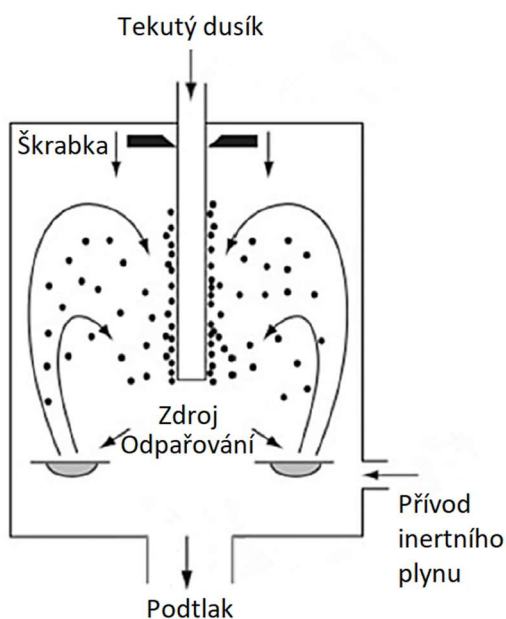
3.1.3 Rotující disk

Při tomto způsobu výroby je na zahřátý rotující disk rozprašována směs materiálu, kde velké odstředivé síly roztrhají směs na malé kapičky. Tyto kapičky se pomocí tepla přivedeného od rotujícího disku vypaří a zanechají za sebou suchý nanoprášek.

Reaktor s rotujícím diskem byl využit pro přípravu nanoprášku z kurkuminu. Částičky kurkuminu měly velikosti okolo 200 nm, pro vyrobení byl využit disk o průměru 18 cm s rychlostí otáčení disku 1500 otáček za minutu. [7]

3.1.4 Kondenzace inertních plynů

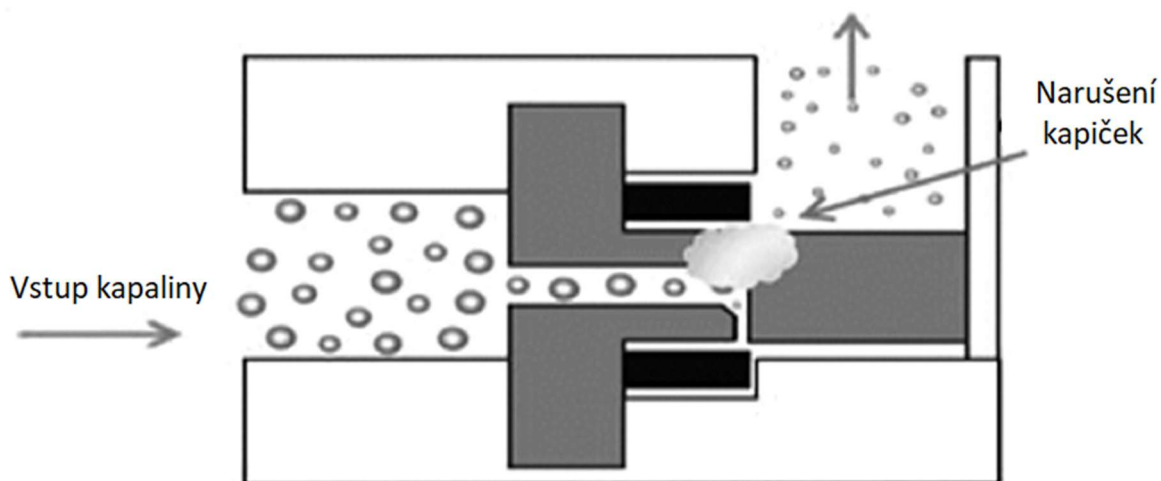
Jedná se o jednu z primitivních metod výroby nanoprášků využívající inertních plynů (např.: helia či arsenu). Do nádoby s inertním plynem je odpařován materiál, který následně zkondenzuje při dotyku stěny ochlazované tekutým dusíkem, kde dojde k rychlému ochlazení a shromažďování materiálu. [8], [9]



Obr. č. 2 – Schématická reprezentace kondenzace inertních plynů [9]

3.1.5 Vysokotlaká homogenizace

Jedná se o tradiční způsob výroby malých kapiček v potravinářském průmyslu. Tato metoda je provedená tak, že je kapalina natlačena za pomoci vysokého tlaku do úzké trysky. Následně je kapalina vypuštěna do nádoby s atmosférickým tlakem, kde díky tlakovému rozdílu, expanze kapaliny vytvoří silné střížné síly, které rozmělní materiál. [3]



Obr. č. 3 – Schématická reprezentace vysokotlakého homogenizéru [3]

„Využívá se v potravinářském průmyslu pro výrobu příchuťových emulzí a nutraceutických emulzí, které mají možné využití v nápojích a mléčných emulzích.“ [3]

3.1.6 Elektronástržik

Tento způsob výroby nanočástic využívá vysokého napětí, aby tavenina polymeru vytlačována skrz trysku utvářela Taylorův kužel a byla vystřelována konstantní rychlostí ve formě jemného vlákna. Toto jemné vlákno je kvůli nízké koncentraci polymeru destabilizováno, díky tomu se z vlákna utváří malé kapičky. [10] Taylorova kuželu je dosaženo tak, že je tavenina daná pod dostatečně velké napětí, které deformuje kapku na konci trysky. Napětí dostatečně deformuje kapku a přesáhne tak povrchové napětí, díky tomu je vystřelováno jemné vlákno taveniny. [3]

Využívá se ve farmaceutickém průmyslu pro výrobu nanokapslí pro kontrolované uvolnění léků. Nano obaly o velikosti $0,86 \pm 16 \mu\text{m}$ byly vyrobeny elektronástržikem pro farmaceutický průmysl. [11] V potravinářském průmyslu se mohou nanoobaly vytvořené elektronástržikem využít podobně, jako ve farmacii, pro kontrolované uvolnění složek, ale také jako ochrana před vlivy prostředí (kyslík, voda, záření), prodloužení doby trvanlivost a další. [10]

3.1.7 Rozprašovací sušárna

Na rozdíl od normálních rozprašovacích sušáren je tato upravena tak, aby byla schopna vyrábět prášek s nanometrovými rozměry. Do nádoby, kam proudí dostatečně ohřátý vzduch je skrze speciálně upravenou hlavu tlačena suspenze vody s potřebným materiálem. Suspenze, která je z hlavy vytlačována, je následně rozprášena, díky tomu se suspenze přemění na mlhu malých kapiček, které se dají snadně vysušit. Suspenze se může rozprášit např. pomocí vzduchových nožů nebo vibrující sítě. Díky tomuto lze sušit i za nižších teplot a materiál tak nemusí přijít o některé své žádané kvality např. vitamíny. [12]

Nanočástice vyrobené v rozprašovacích sušárnách najdou své využití nejen ve farmaceutickém průmyslu, kde se využívají pro kontrolované vypuštění léku, ale i v potravinářském průmyslu. Nanoprášky vyrobené v rozprašovací sušárně mají podobné využití v potravinářském průmyslu, jako nanoprášky vyrobené elektronástríkem. [3]

3.2 Chemické metody

Chemické metody pro výrobu nanoprášků využívají zejména bottom-up způsoby. Tyto metody závisí převážně na míchání správných směsí za správných podmínek a na jejich chemických reakcích, které skládají nanoprášek atom po atomu.

3.2.1 Metoda sol-gel

Levná chemická metoda výroby nanoprášků. Tato metoda využívá dva komponenty. Jak již název napovídá, první složkou je takzvaný „sol“, jedná se o koloidní suspenzi pevných částic v kapalině. Dále složka „gel“ jsou polymery obsahující kapalinu. V tomto chemickém procesu se „soly“ postupně přeměňují na „gely“, které obsahují kapalinu a v ní samostatné částice nebo sítě polymerů. Pro odstranění přebytečné vody je třeba využít sušícího procesu. V sušícím procesu dochází ke značnému sražení a zahuštění látky, tento proces silně ovlivňuje výslednou podobu prášku. [3]

Nanočástice vyrobená metodou sol-gel byla využita, jako senzor, pro zaznamenání ethanolových par, což je jeden z důležitých parametrů v potravinářském průmyslu. [3]

3.2.2 Syntéza polyolů

„Jedná se o proces výroby směsí obsahujících kovové prvky pomocí polyolů, vícesytných alkoholů, kde polyol plní roli rozpouštědla, redukčního a oxidačního činidla zároveň se stabilizujícími/ochrannými činidly.“ [8]

3.2.3 Tepelné rozložení

Chemická reakce vhodného materiálu ve vodním roztoku probíhá v nádobě při vysokých teplotách a při vysokém tlaku. Tento proces je vhodný pro látky, které nejsou za normálního tlaku a teploty rozložitelné. [3]

3.3 Biologické metody

„Konvenčně se nanoprášky vyráběly a stabilizovaly pomocí drahých chemických a fyzických procesů, kde využití toxických materiálů s potencionálně nebezpečnými vlastnostmi vede k toxickému prostředí, cytotoxicitě a rakovinotvorným vlastnostem.“ [3] Nanoprášky vyrobené pomocí těchto metod jsou netoxické a ekologické [3]. Pro výrobu nanoprášků se zde využívají i rostliny a mikroorganismy.

3.3.1 Metoda polysacharidů

Pomocí této metody jsou nanoprášky vytvářeny z polysacharidů, které fungují jako uzavírací činidlo. Uzavírací činidlo je látka s rozpustností jak v tucích, tak ve vodě a obsahuje polární a nepolární uhlovodíkovou složku. Pro výrobu polysacharidů se využívá samo-sestavení, kde biomolekuly za určitých podmínek okamžitě vytvoří nanomateriály. [3], [13]

Nanočástice vyrobené touto metodou mají využití jak v potravinářském průmyslu, tak i ve farmacii. V potravinářském průmyslu se využití nanočástic vyrobených touto metodou zkoumá u rozložitelných obalů na potraviny. [3]

3.3.2 Využití rostlin pro výrobu nanoprášků

Konkrétně se pro tuto metodu využívají výtažky z rostlin, které se smíchají s roztokem kovové soli při pokojové teplotě. Tato reakce může trvat jen pár minut. Pro tuto metodu se využívá například aloe vera, voňatka (citrónová tráva), azadirachta indická a další. [14]

Z kořenů a listů některých léčivých rostlin se dají vyrobit nanočástice zlata a stříbra, které se následně využívají ve farmacii. [14], [15] Některé potraviny a jejich zbytkový odpad se využily pro výrobu nanočástic. [3]

3.3.3 Využití mikroorganismů pro výrobu nanoprášků

Mechanismus pro výrobu nanoprášků pomocí mikroorganismů závisí na enzymech daných mikroorganismů. *„Mikroorganismy mají schopnost shromažďovat a detoxifikovat těžké kovy pomocí redukčních enzymů, které dokáží redukovat kovové soli na kovové nanočástice s úzkou křivkou distribuční velikosti.“* [15] Mikroorganismy dokáží vytvořit nanočástice intracelulárně nebo extracelulárně. [3], [15]

Pomocí některých bakterií se dají vyrobit nanočástice zlata a stříbra, které se následně využívají ve farmacii. [15]

3.4 Vhodné metody výroby pro potravinářský a farmaceutický průmysl

V tabulce č. 1 jsou uvedeny aplikace způsobů výroby nanoprášek ve farmaceutickém a potravinářském průmyslu. Pokud je buňka v tabulce prázdná, tak to znamená, že autor nenašel žádné relevantní zdroje, které by potvrdily využití dané technologie výroby nanoprášek pro dané průmyslové odvětví.

| Způsob výroby | Potravinářský průmysl | Farmaceutický průmysl |
|----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Mletí | ANO | ANO |
| Superkritické kapaliny | ANO | ANO |
| Rotující disk | ANO | - |
| Kondenzace inertních plynů | - | - |
| Vysokotlaká homogenizace | ANO | - |
| Elektronáštřík | ANO | - |
| Nanorozprašovací sušárna | ANO | ANO |
| Metoda sol-gel | ANO | - |
| Syntéza polyolů | - | - |
| Tepelné rozložení | ANO | ANO |
| Metoda polysacharidů | ANO | ANO |
| Využití rostlin | ANO | ANO |
| Využití mikrobů | - | ANO |

Tabulka č. 1 – Využití technologie výroby nanočástic v potravinářském a farmaceutickém průmyslu

4. Separace nanočástic

Po vytvoření nanočástic jednotlivými způsoby výroby je třeba je separovat z jejich nosného média. Kvůli malé velikosti těchto částic je potřeba využít separačních metod, které jsou schopny tyto nanočástice separovat z nosného média, např. ze vzduchu, či vody. V této kapitole jsou vypsány využívané způsoby separace nanočástic.

4.1 Filtry

Filtry vyrobené z materiálu, jako jsou např. celulózová vlákna se používají pro separaci nanometrových částic z kapalin, či plynů. Vlákna použitá pro tuto separaci musí mít velmi malé rozměry, aby zachytily nanočástice. [4]

4.2 Elektrostatická precipitace

Tento způsob separace využívá sil elektrického pole. Filtr funguje pomocí kovových drátů, které jsou dány mezi vertikálně postavené plechy, které jsou buď nabitě nebo uzemněné. Velké napětí proudící mezi těmito dráty a deskami ionizuje nosný plyn a nově nabitě částice v nosném plynu jsou tak přitahovány k těmto deskám. Nashromážděné nanočástice mohou být posbírány, poté co se vypne elektrický proud. Tento typ filtrů se využívá pouze pro separaci z plynů. [4]

5. Využití nanoprášků v potravinářském průmyslu

Nanoprášky se díky svým vlastnostem hojně používají v mnoha průmyslových odvětvích, například ve farmaceutickém průmyslu, elektronice, energetice a v potravinářském průmyslu. Využívají se zejména díky svým jedinečným vlastnostem. V posledních desetiletích se začalo zkoumat využití nanoprášků i v potravinářském průmyslu, kde by mohl materiál s nanometrovými rozměry vyřešit spousty otázek a vylepšit vlastnosti potravinářských produktů. Mnoho nanoprášků bylo vyrobeno, aby dodalo funkce potřebné v potravinářském průmyslu, některá tato využití jsou popsána v této kapitole. [2], [16]

Nanočástice vyrobené pro potravinářský průmysl mají různé struktury, které ovlivňují jejich využití pro potraviny. Mezi druhy struktur používaných v potravinářském průmyslu patří zejména:

- Nanoemulze – oleje ve vodě nebo naopak, mají většinou velikost v rozmezí 20-200 nm. Nanoemulze se využívají ve farmaceutickém a potravinářském průmyslu, ale také v kosmetice. V potravinářském průmyslu se využívají pro zapouzdření bioaktivních složek. [3], [17]
- Nanokapsle – mají obal utvořený z polymeru a vnitřní kapalné jádro, ve kterém mohou být uchované nebo rozpuštěné bioaktivní složky. Nanokapsle mají obvykle velikosti od 10 do 1000 nm. [17]
- Nanokuličky – jedná se o sférické nanočástice. Podobně jako u nanokapslí se jejich velikost pohybuje mezi 10-1000 nm. [17]
- Pevné lipidové nanočástice – využívají se pro kontrolované vypuštění látek a pro ochranu složek proti chemické degradaci. [17]
- Nanolipozomy – jedná se o sférické částice s nanometrovými rozměry vytvořené polárními lipidy. Díky jejich struktuře umí lipozomy uchovat hydrofilní látky v jejich kapalném jádře nebo dokáží uchovat lipofilní látky v jejich lipidovém obalu. [17]

5.1 Chuť a vzhled potravin

Nanoprášky nabízejí mnoho možností využití pro zlepšení kvality potravin a zlepšení chuťového zážitku při jejich požití. Dále se mohou využívat pro dodání nutričních hodnot a pro barvivo. Nanokapsle mohou fungovat jako nosiče potřebných složek, jako jsou například antioxidanty, antimikrobiální složky nebo jako nosiče dodatečné chuti. [3], [16]

5.2 Ochrana labilních sloučenin

Mnoho bioaktivních složek je citlivých na vlivy prostředí, jako je například teplo, UV záření, enzymy a pH. Uložení těchto bioaktivních složek do nanokapslí nebo pevných lipidových nanočástic,

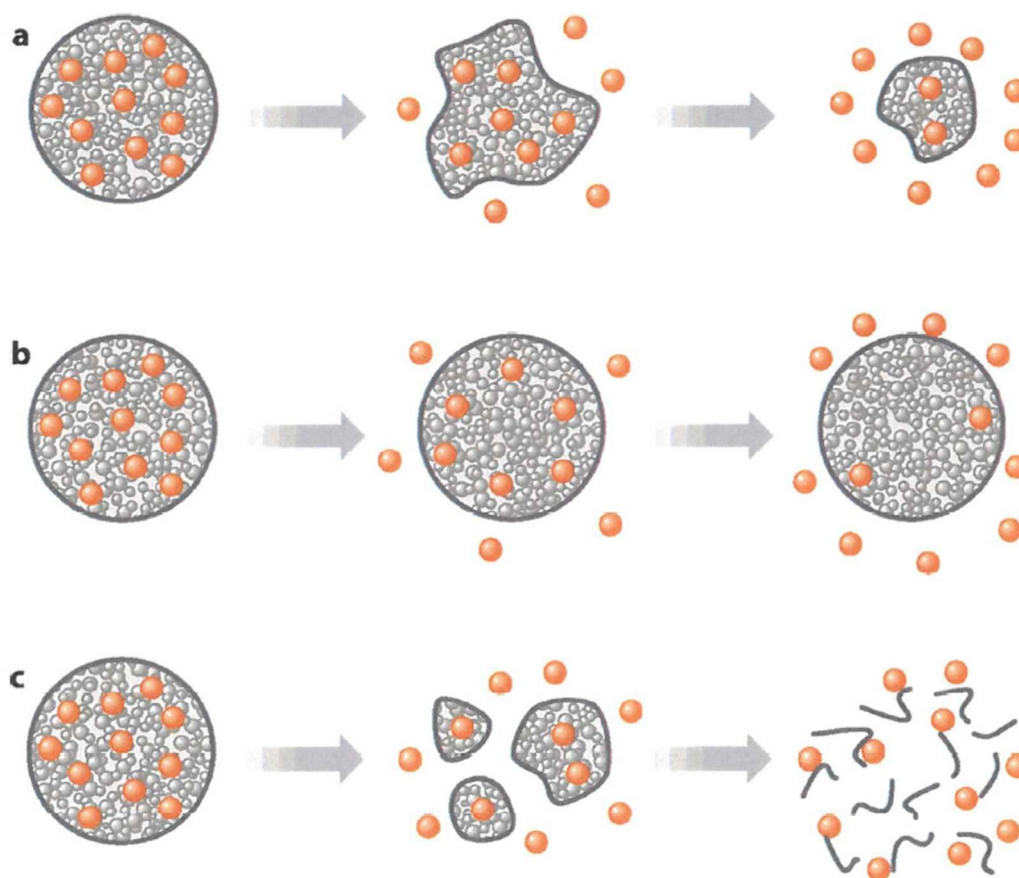
kteře by měly tyto složky ochránít před vnějšími vlivy, prodlouží trvanlivost potravin nebo ochrání složky, dokud se nedostanou na předem určené místo. Nanoprášky mohou být vytvořeny, aby dokázaly odolávat enzymům. [2], [3], [16]

5.3 Funkční nanoprášky pro stabilizování emulzí a pěn

Emulze by mohly za pomoci pevných nanočástic dosáhnout dlouhodobé stability. Nanoprášky by se mohly využít pro zlepšení stability struktury zmrzliny, kde by pevné nanočástice mohly zamezit koalescenci, zamezit procesu postupného spojování krystalů ledu. [2]

5.4 Dodání bioaktivních složek

Nanoprášky mohou být využity ke zlepšení dodávání potřebných složek do určité části těla nebo v předem stanoveném čase. Existují studie na systémy dodávání potřebných látek pro vylepšené dodání, vlastnosti a funkci bioaktivních složek po požití. Existují 3 způsoby dodání bioaktivních složek, které jsou zobrazeny na obr. č. 4. [2], [3], [16]



Obr. č. 4 – Způsoby dodání bioaktivních složek [2]

Dodání bioaktivních složek může probíhat postupným rozložením nanoprášku (Obr. č. 4 a) nebo difuzí, která funguje na základě rozdílných koncentrací (Obr. č. 4 b). Poslední typ dodání je náhlé prasknutí nanočástice při dotyku s určitým spouštěčem (Obr. č. 4 c). Jako spouštěč se může využít teplo, určitá hladina pH a enzymy. Příkladem tohoto je vypuštění sladidel ve žvýkačce a kontrolované vypuštění léků. [2], [3]

5.5 Obaly potravin a jedlé povlaky

Tradiční obal na potraviny musí zajistit ochranu a uchování, nanoprášky by tyto funkce mohly vylepšit a ještě přidat další. Nanoprášky mohou obalům dodat vylepšené mechanické vlastnosti. Použitím některých anorganických nanoprášků by mohly obaly disponovat silnými antimikrobiálními vlastnostmi a lepšími vlastnostmi v extrémních podmínkách. Nanočástice jsou využívány pro obaly potravin, aby vytvořily ochranu před extrémními tepelnými podmínkami a nárazy, tímto mohou nanočástice prodloužit dobu trvanlivosti. [3], [16]

Některé nanoprášky se využívají pro vytvoření biosenzorů. Tyto nanosenzory reagují na změnu prostředí, například změna vlhkosti, teploty nebo na přítomnost nechtěných mikrobů. [3], [16]

Nanoprášky se dají včlenit do povlaků a filmů potravin, aby zlepšily jejich vlastnosti. Použitím nanoprášků se na potravinách může utvořit jemný transparentní film, který chrání potravinu, ale zároveň i zachová její přirozený vzhled. [2]

6. Závěr

Literární rešerše shrnuje způsoby výroby a aplikace nanoprášků v potravinářském průmyslu. Vzhledem k dostupnosti rozprašovací sušárny s nebulizační hlavou na pracovišti, budu svůj návrh zařízení pro výrobu nanoprášků směřovat k rozprašovacímu sušení.

Druhá část – praktická část

7. Ideový návrh rozprašovací sušárny

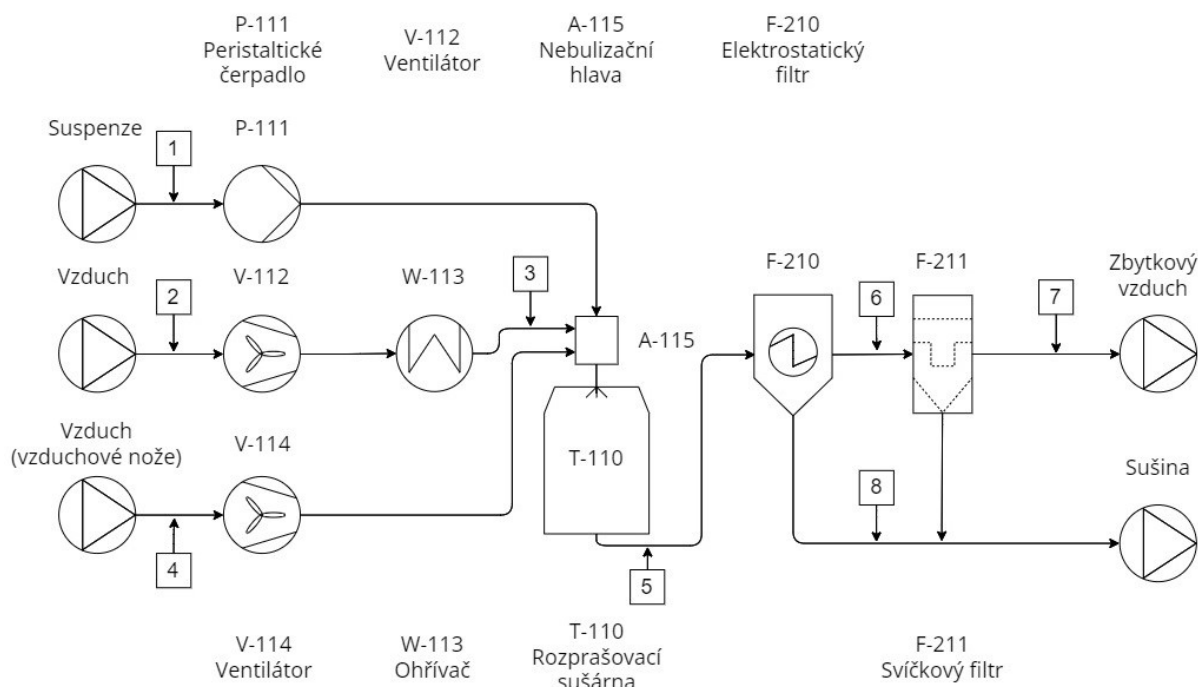
V této kapitole jsem provedl ideový návrh rozprašovací sušárny pro výrobu nanoprášků z požadavků dodaných vedoucím bakalářské práce.

7.1 Schéma navržené sušárny

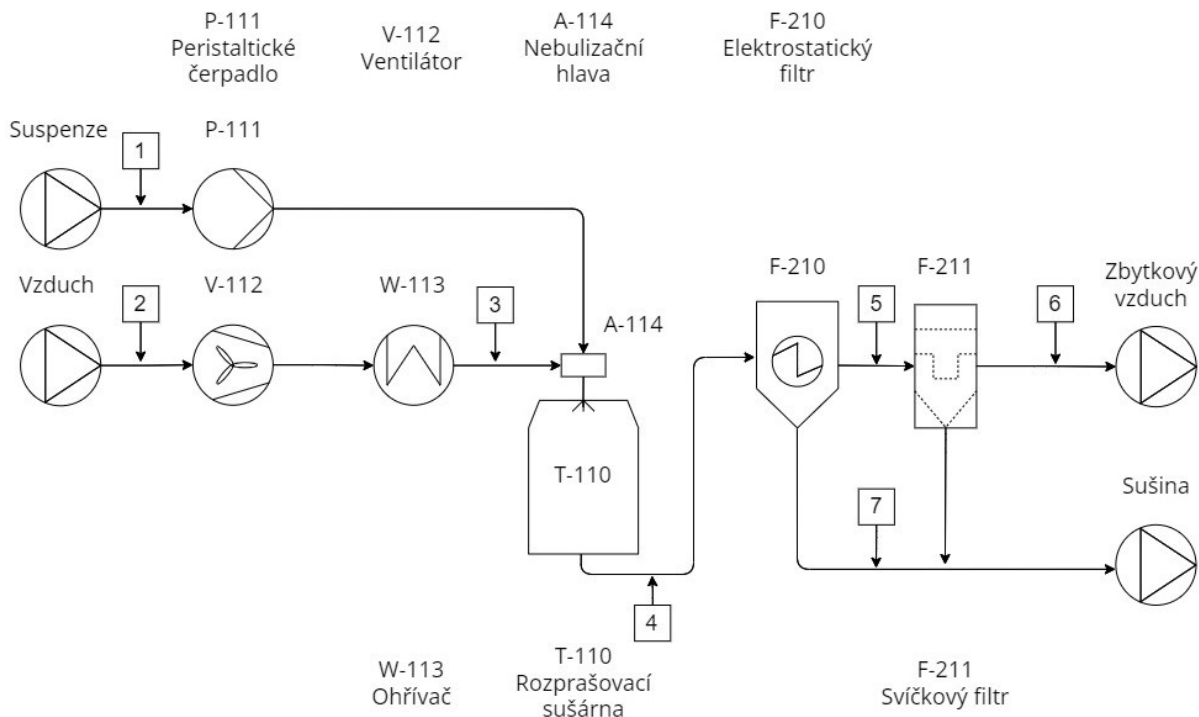
Z dat dostupných z využitých zdrojů jsem vytvořil proudové technologické schéma – PFD popisující využitě přístroje pro zhotovení výrobního zařízení. Podle dostupných zdrojů jsem navrhl dvě varianty, které jsou níže popsány.

Varianta A (obr. č. 5), která využívá vzduchové nože. Vzduch je hnán do hlavy pod určitým tlakem, kde se díky speciálně upravené hlavě vytvoří vzduchové nože, které suspenzi tlačnou skrz hlavu rozpraší na mlhu pro snadnější sušení. Malé kapičky se dají sušit i za pomoci nižších teplot a neztratí tak své žádané kvality, například vitamíny.

Varianta B (obr. č. 6) používá hlavu s vibrující sítí. Tato síť obsahuje mikrometrové díry. Díky vibračním síť produkuje miliony malých kapiček, které se dají snadno vysušit, toto zajišťuje stejně jak u varianty A, že se suspenze může sušit za nižších teplot. [3], [12]



Obr. č. 5 – Schéma sušárny varianta A



Obr. č. 6 – Schéma sušárny varianta B

V obou variantách využívám peristaltické čerpadlo pro dopravení suspenze do nebulizační hlavy, tuto variantu jsme vyzkoušeli při praktickém měření a dosáhli jsme s ním nejlepších výsledků. Samozřejmě se dají využít jiná čerpadla, jako je například zubové, membránové nebo pístové.

Pro proudění vzduchu využívám ventilátor, který má dostatečný výkon pro dopravení dostatečného objemu vzduchu pro vysušení suspenze. Ohřívač musí mít dostatečný výkon pro ohřátí potřebného objemu vzduchu na požadovanou teplotu pro vysušení suspenze. Potřebný výkon pro odpaření vody a potřebný objem vzduchu je vypočtený v kapitole 7.2.

V obou variantách jsem použil elektrostatický a svíčkový filtr na zachycení nanoprášku. První je elektrostatický filtr, který zachytí většinu nanoprášku. Nezachycený nanoprášek následně musí projít ještě přes svíčkový filtr. Jedná se o jednoduchou a levnou variantu. Tento filtr by se musel často čistit nebo vyměňovat. Další nevýhodou tohoto filtru je, jak dostat zachycený nanoprášek z vláken pryč. [4], [12]

Na protlačení vzduchu skrz tyto filtry je potřeba vyšší výkon, proto bych použil ventilátor s větším výkonem, aby se nemohlo stát, že při měření průtoku vzduchu bez filtrů je vše v pořádku, ale s připojenými filtry výkon ventilátoru nestačí na požadovaný průtok vzduchu. Také by bylo možné dodat za elektrostatický filtr druhý sací ventilátor, který by nedostatečný výkon prvního ventilátoru kompenzoval.

Proudové technologické schéma bylo zhotoveno na stránkách <https://online.visual-paradigm.com>.

| Proud | Prac. teplota [°C] | Prac. tlak [Pa] | Složky |
|-------|--------------------|-----------------|------------|
| 1 | T_{atm} | | Suspenze |
| 2 | T_{atm} | | Vzduch |
| 3 | 60* | | Vzduch |
| 4 | T_{atm} | | Vzduch |
| 5 | 60* | p_{atm}^* | Aerosol |
| 6 | 60* | p_{atm}^* | Aerosol |
| 7 | 60* | p_{atm}^* | Vzduch |
| 8 | 60* | p_{atm}^* | Nanoprášek |

Tabulka č. 2 – Popis proudů varianta A

| Proud | Prac. teplota [°C] | Prac. tlak [Pa] | Složky |
|-------|--------------------|-----------------|------------|
| 1 | T_{atm} | | Suspenze |
| 2 | T_{atm} | | Vzduch |
| 3 | 60* | | Vzduch |
| 4 | 60* | p_{atm}^* | Aerosol |
| 5 | 60* | p_{atm}^* | Aerosol |
| 6 | 60* | p_{atm}^* | Vzduch |
| 7 | 60* | p_{atm}^* | Nanoprášek |

Tabulka č. 3 – Popis proudů varianta B

V tabulkách č. 2 a 3 jsou hodnoty označené * odhadnuté.

7.2 Hmotová bilance sušárny

V této části jsem provedl hmotovou bilanci sušárny dle zadaných údajů od vedoucího bakalářské práce. Zadané vstupní hodnoty jsou vypsány v tabulce č. 4. Začal jsem podrobným postupem výpočtu. Na konci kapitoly je přehledná tabulka vypočtených hodnot.

| | | |
|----------------------------|-------|----------------|
| Produkce prášku | 5 g/h | \dot{m}_{1p} |
| Konečná vlhkost prášku | 5 % | X_1 |
| Počáteční „vlhkost“ prášku | 99 % | X_0 |

Tabulka č. 4 – Zadané vstupní hodnoty

Ze vstupních hodnot jsem vypočetl množství vyprodukované sušiny \dot{m}_p .

$$\dot{m}_p = \dot{m}_{1p} \cdot (1 - X_1) = 5 \cdot (1 - 0,05) = 4,75 \text{ g/h} \quad (7.1)$$

Následně jsem vypočetl potřebné množství suspenze \dot{m}_s na vstupu do sušárny pro vyprodukování dostatečného množství sušiny.

$$\dot{m}_s = \frac{\dot{m}_p}{1 - X_0} = \frac{4,75}{1 - 0,99} = 475 \text{ g/h} \quad (7.2)$$

$$\dot{m}_s = 475 \text{ g/h} = 1,32 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s} \quad (7.3)$$

Z celkové hmotnosti suspenze jsem snadno zjistil hmotnostní průtok odpařené vody \dot{m}_{w1} , ze které jsem následně vypočetl potřebné množství vzduchu \dot{m}_A pro odpaření této přebytečné vody. Pro výpočet množství potřebného vzduchu \dot{m}_A jsem odhadl z Mollierova diagramu rozdíl vlhkosti vzduchu pro zadané teploty (30-60 °C) $dx = 0,004 \text{ kg/kg}$.

$$\dot{m}_{w1} = \dot{m}_s - \dot{m}_{1p} = 475 - 5 = 470 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1} = 1,31 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (7.4)$$

$$\dot{m}_A = \frac{\dot{m}_{w1}}{dx} = \frac{0,47}{0,004} = 117,5 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} = 0,03264 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (7.5)$$

Rozdíl entalpií vzduchu jsem z Mollierova diagramu odečetl jako $dh = 10 \text{ kJ/kg}$. Díky tomu jsem vypočetl potřebný tepelný výkon dodaný do soustavy \dot{Q} a následně i potřebný výkon pro odpaření vody \dot{Q}_L . Výparné teplo vody $Q_{výp} = 2257 \text{ kJ/kg}$.

$$\dot{Q} = dh \cdot \dot{m}_A = 10 \cdot 0,03264 = 0,3264 \text{ kJ/s} = 326,4 \text{ W} \quad (7.6)$$

$$\dot{Q}_L = Q_{výp} \cdot \dot{m}_{w1} = 2257 \cdot 1,31 \cdot 10^{-4} = 294,66 \text{ W} \quad (7.7)$$

| | | | |
|---|----------------|----------------------|-------------------|
| Produkce prášku | \dot{m}_{1p} | 5 | g/h |
| Konečná vlhkost prášku | X_1 | 5 | % |
| Počáteční „vlhkost“ prášku | X_0 | 99 | % |
| Množství vyrobené sušiny | \dot{m}_p | 4,75 | g/h |
| Množství zbytkové vody v produktu | \dot{m}_{w2} | 0,25 | g/h |
| Množství suspenze na vstupu | \dot{m}_s | 475 | g/h |
| | | 0,475 | kg/h |
| | | 7,92 | g/min |
| | | $1,32 \cdot 10^{-1}$ | g/s |
| | | $1,32 \cdot 10^{-4}$ | kg/s |
| Množství odpařené vody | \dot{m}_{w1} | 470 | g/h |
| | | 0,47 | kg/h |
| Rozdíl vlhkosti vzduchu – odhad (30-60 °C) | dx | 0,004 | kg/kg |
| Potřebné množství vzduchu | \dot{m}_A | 117,5 | kg/h |
| | | $3,26 \cdot 10^{-2}$ | kg/s |
| | | 97,92 | m ³ /h |
| | | $2,72 \cdot 10^{-2}$ | m ³ /s |
| Rozdíl entalpií vzduchu – odhad | dh | 10 | kJ/kg |
| Potřebný výkon | \dot{Q} | 326,39 | W |
| Výparné teplo | $Q_{výp}$ | 2 257 | kJ/kg |
| Výkon potřebný k odpaření vody | \dot{Q}_L | 294,66 | W |
| Ztrátový výkon | \dot{Q}_z | 31,73 | W |

Tabulka č. 5 – souhrn zadaných a vypočtených hodnot

7.3 Výpočet rozměrů sušící komory

Vedoucí bakalářské práce mně zadal základní hodnoty pro navržení rozměrů sušárny. V této kapitole je uveden výpočet rozměrů sušící komory. V tabulce č. 6 je zadaná vstupní hodnota vedoucím bakalářské práce. Opět je výpočet ze začátku podrobně popsán a na konci kapitoly se nachází tabulka s konečnými hodnotami sušící komory.

| | | |
|-----------------------------|-------|--------|
| Průměr sušící komory | D_s | 300 mm |
|-----------------------------|-------|--------|

Tabulka č. 6 – Zadaný průměr

Nejprve jsem musel vypočítat čas potřebný k vysušení kapiček suspenze. Rovnice (7.8) pro výpočet potřebného času pro vysušení jedné kapičky byla přebrána z [18], kde $R_{s,0}$ je poloměr kapičky v čase $t = 0$, R je poloměr kapičky v určitém čase, D_v je difuzní součinitel vodní páry ve vzduchu, M je molární hmotnost vody, ρ_L je hustota vody, R_M je molární plynová konstanta, T je teplota, P_s je tlak nasycených par vody, P_∞ je tlak okolí a t je čas.

$$R_{s,0}^2 - R^2 = \frac{2 \cdot D_v \cdot M}{\rho_L \cdot R_M \cdot T} \cdot (P_\infty - P_s) \cdot t \quad (7.8)$$

Z rovnice (7.8) jsem vyjádřil čas potřebný k usušení jedné kapičky.

$$t = (R_{s,0}^2 - R^2) \cdot \frac{\rho_L \cdot R_M \cdot T}{2 \cdot D_v \cdot M \cdot (P_\infty - P_s)} \quad (7.9)$$

Potřebné hodnoty jednotlivých veličin pro výpočet jsou v tabulce č. 8. Velikost poloměru kapičky byl zadán vedoucím práce. Tlak nasycených par jsem vypočítal pomocí Antoineovy rovnice, konstanty potřebné pro výpočet tlaku nasycených par vody jsou v tabulce č. 7.

| | |
|---|----------|
| A | 23,1964 |
| B | 3 816,44 |
| C | -46,13 |
| T | 333,15 K |

Tabulka č. 7 – Hodnoty do Antoineovy rovnice

$$\ln p_s = A - \frac{B}{T + C} = 23,1946 - \frac{3816,44}{333,15 - 46,13} = 9,8996 \quad (7.10)$$

$$p_s = e^{9,8996} = 19\,922,4 \text{ Pa} \quad (7.11)$$

| | |
|------------|---|
| $R_{s,0}$ | $1 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ |
| R | 0 m |
| ρ_L | $983,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ |
| R_M | $8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ |
| T | $333,15 \text{ K}$ |
| D_v | $0,35 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ |
| M | $0,018 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ |
| p_∞ | $101\,325 \text{ Pa}$ |
| p_s | $19\,922,4 \text{ Pa}$ |

Tabulka č. 8 – Hodnoty potřebných veličin

Hodnoty z tabulky č. 8 se vložily do rovnice (7.9) pro výpočet času potřebného k vysušení jedné kapičky.

$$t = ((1 \cdot 10^{-7})^2) \cdot \frac{983,2 \cdot 8,314 \cdot 333,15}{2 \cdot 0,35 \cdot 10^{-4} \cdot 0,018 \cdot (101\,325 - 19\,922,4)} = 2,66 \cdot 10^{-7} \text{ s} \quad (7.12)$$

Podle rovnice (7.12) vyšlo, že pro vysušení jedné kapičky stačí $2,66 \cdot 10^{-7}$ sekund. Takto nízké číslo vyšlo kvůli zjednodušením rovnice. Uvedená rovnice uvažuje pouze jednu kapičku v sušícím prostředí, ale v reálném zařízení pro sušení nanoprášku se takovýchto kapiček nachází miliony, takové množství kapiček se navzájem ovlivňuje, a proto nemohu využít tuto hodnotu pro návrh rozměrů sušícího zařízení. Na místo vypočítané hodnoty jsem využil hodnoty navržené vedoucím bakalářské práce. Navržená hodnota časového zdržení kapiček v sušící komoře je $\bar{t} = 1 \text{ s}$.

Pro výpočet rozměrů sušící komory jsem využil hodnoty z kapitoly č. 7.2. Použité hodnoty pro výpočet jsou v tabulce č. 9.

| | | |
|--|--------------|-------------------------------|
| Poloměr sušící komory | r_s | 150 mm |
| Hmotnostní průtok vzduchu | \dot{m}_A | 0,032639 kg · s ⁻¹ |
| Střední doba zdržení | \bar{t} | 1 s |
| Hustota suchého vzduchu při 60 °C | ρ_{A60} | 1,06 kg · m ⁻³ |

Tabulka č. 9 – Hodnoty pro výpočet

Ze začátku jsem vypočítal objemový průtok vzduchu pomocí hustoty vzduchu při teplotě 60 °C ρ_{A60} .

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}_A}{\rho_{A60}} = \frac{0,032639}{1,06} = 0,030792 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (7.13)$$

Pomocí objemového průtoku a střední doby zdržení lze snadno vypočítat objem sušící komory.

$$\bar{t} = \frac{\dot{V}}{V_s} = \frac{\dot{V}}{\pi \cdot r_s^2 \cdot v_s} \quad (7.14)$$

Z rovnice (7.14) jsem vyjádřil výšku sušící komory v_s a následně ji pomocí předem vypočtených, či zadaných hodnot vypočetl.

$$v_s = \frac{\dot{V}}{\pi \cdot r_s^2 \cdot \bar{t}} = \frac{0,030792}{\pi \cdot 0,15^2 \cdot 1} = 0,43562 \text{ m} \quad (7.15)$$

Výsledná výška sušící komory vyšla 435,62 mm, ale aby se předešlo nečekaným ztrátám při sušení, bylo zaručeno potřebné vysušení prášku a pro levnější výrobu, tak navrhuji výšku sušící komory zaokrouhlit na $v_N = 450$ mm.

Jelikož jsem zaokrouhlil výšku sušící komory, bylo třeba vypočítat novou dobu zdržení částice. Pro výpočet nové doby zdržení jsem vypočítal rychlost částice a z této rychlosti již snadno vypočítal novou dobu zdržení. Pro výpočet rychlosti jsem využil rovnici pro střední rychlost (7.16). Rychlost se také dala snadno vypočíst pomocí výšky sušící komory v_s vynásobené časem zdržení \bar{t} .

$$\bar{u} = \frac{\dot{V}}{S_s} = \frac{\dot{V}}{\pi \cdot r_s^2} = \frac{0,030792}{\pi \cdot 0,15^2} = 0,43562 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (7.16)$$

$$\bar{t}_n = \frac{v_N}{\bar{u}} = \frac{0,45}{0,43562} = 1,033 \text{ s} \quad (7.17)$$

V tabulce č. 10 jsou vypsány konečné rozměry sušící komory.

| | | |
|-------------------------|-----------|--------------------------|
| Průměr | D_s | 300 mm |
| výška | v_N | 450 mm |
| Čas zdržení | \bar{t} | 1,033 s |
| Střední rychlost | \bar{u} | 0,44 m · s ⁻¹ |

Tabulka č. 10 – Rozměry a další hodnoty sušící komory

7.4 Závěr ideového návrhu

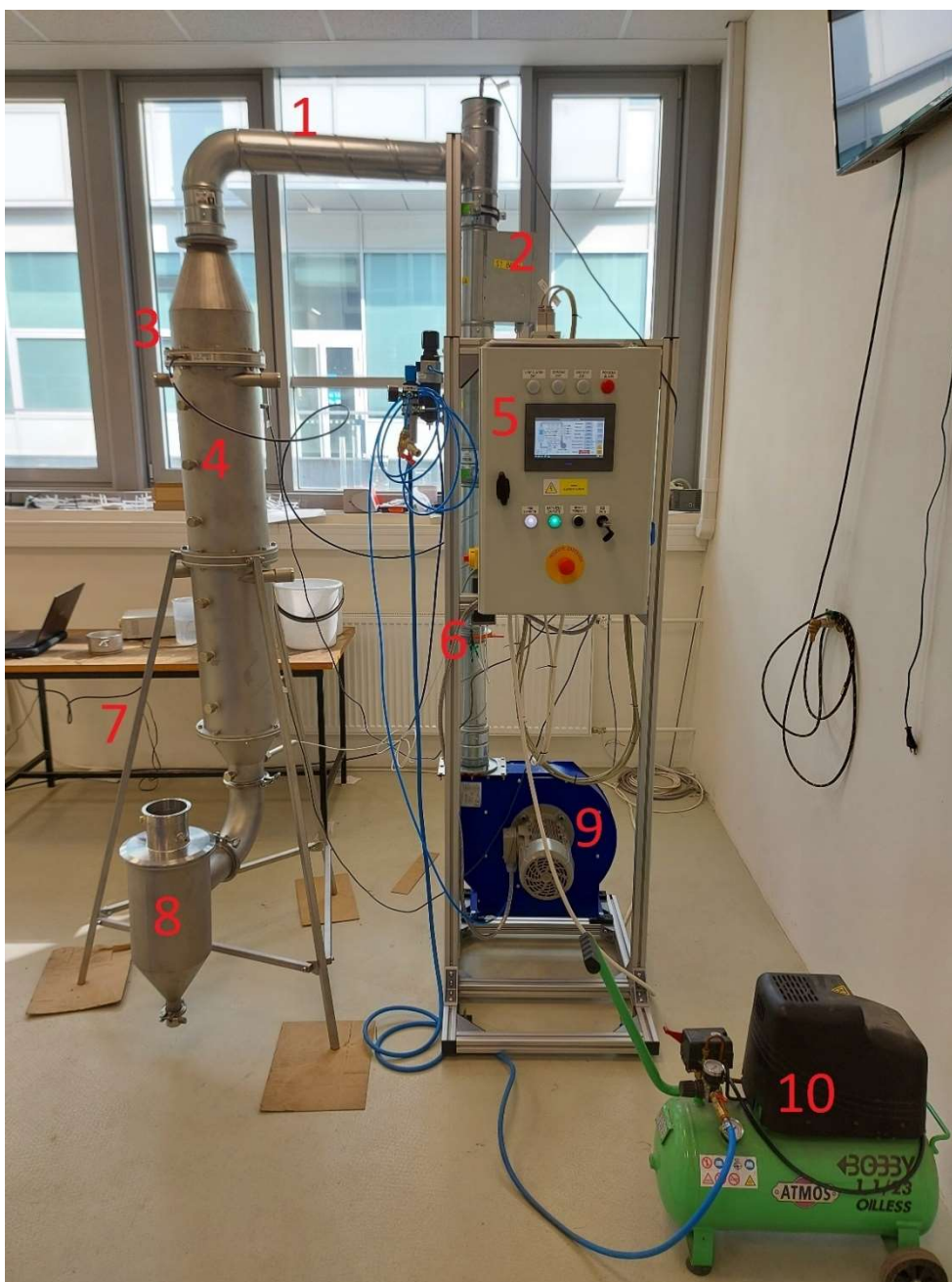
Ideově jsem navrhl 2 varianty rozprašovacích sušáren a na základě zadaných hodnot jsem následně zhotovil hmotností bilanci, díky které jsem navrhl rozměry možné sušící komory.

8. Experimenty na laboratorním zařízení

Experimenty byly provedeny na již postavené nebulizační sušárně v laboratořích ústavu Procesní a zpracovatelské techniky ČVUT.

8.1 Popis nebulizační sušárny

Ačkoliv jsem se nepodílel na navrhování nebulizační sušárny, tak jsem sušárnu pečlivě studoval a v této kapitole ji podrobně popsal. Sušárna je zde popsána bez využitího peristaltického čerpadla.



Obr. č. 7 – Fotografie nebulizační sušárny

| | |
|-----------|--|
| 1 | Přívodní potrubí sušícího vzduchu do sušárny 100 mm |
| 2 | Kalorifer |
| 3 | Vstup suspenze a vzduchových nožů |
| 4 | Sušící komora |
| 5 | Řídící jednotka |
| 6 | Klapka |
| 7 | Stojan |
| 8 | Jednoduchý filtr (filtrační přepážka z tkaniny z nanovláken) |
| 9 | Ventilátor Livent 4, Vzduchotechnik Chrastava |
| 10 | Kompresor ATMOS 1.1/23 OILLESS |

Tabulka č. 11 – popis obr. 7

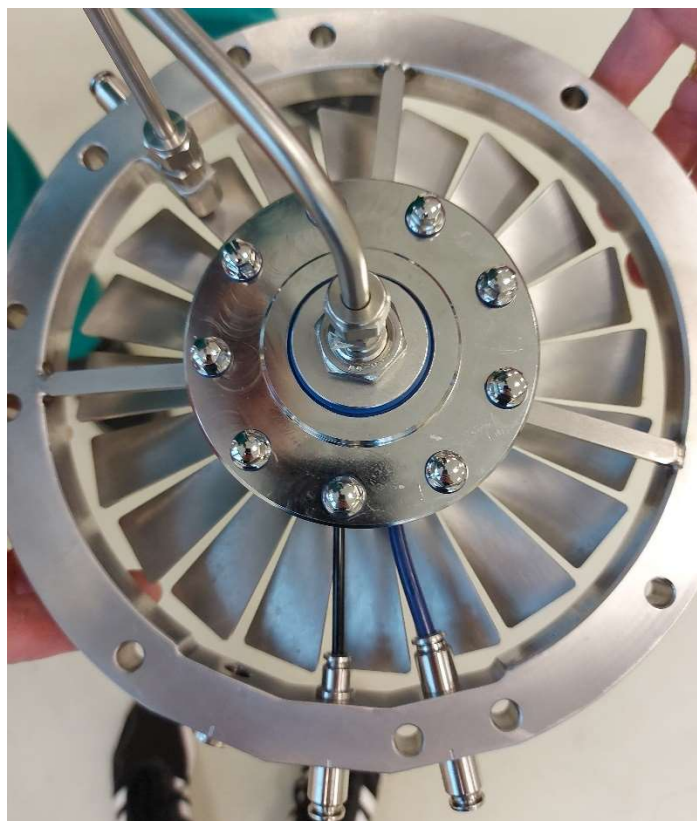


Obr. č. 8 – Detail klapky



Obr. č. 9 – Detail řídicí jednotky

Vzduch je do sušárny hnán ventilátorem. Otáčky tlačného ventilátoru se regulují frekvenčním měničem v rozmezí 10-50 Hz. Frekvenční měnič je ovládán z dotykového panelu. Hnaný vzduch je v potrubí ohříván třemi kalorifery na požadovanou teplotu. Každý kalorifer má výkon 800 W, tudíž dohromady mají výkon 2,4 kW. Průtok vzduchu do potrubí navíc reguluje klapka. Klapka zabudovaná v potrubí má 7 stupňů polohy škrťacího elementu, čím vyšší stupeň tím méně zamezuje vstupu vzduchu do potrubí. Ohřátý vzduch dojde do sušící komory, kde je pomocí lopatkové mříže ve speciálně upravené nebulizační hlavě roztočen. Suspenze je hnaná vhodně zvoleným čerpadlem do nebulizační hlavy, kde projde skrz mikrometrovou díru do sušící komory. Díra skrze, kterou prochází suspenze je ovládána membránou, která je ovládána velikostí tlaku, čím nižší tlak tím více je otevřená membrána (0-2 bary). Skrze speciální nebulizační hlavu do sušící komory proudí střížný vzduch ze vzduchových nožů, které rozpráší vstupující suspenzi na mlhu pro lepší sušení. Intenzita vzduchových nožů závisí na tlaku vstupujícího vzduchu, maximum je 5,5 baru a minimum 0 barů, tudíž vzduchovými noži neproudí žádný vzduch do komory. Membrána a vzduchové nože jsou ovládány kompresory.



Obr. č. 10 – Detail nebulizační hlavy

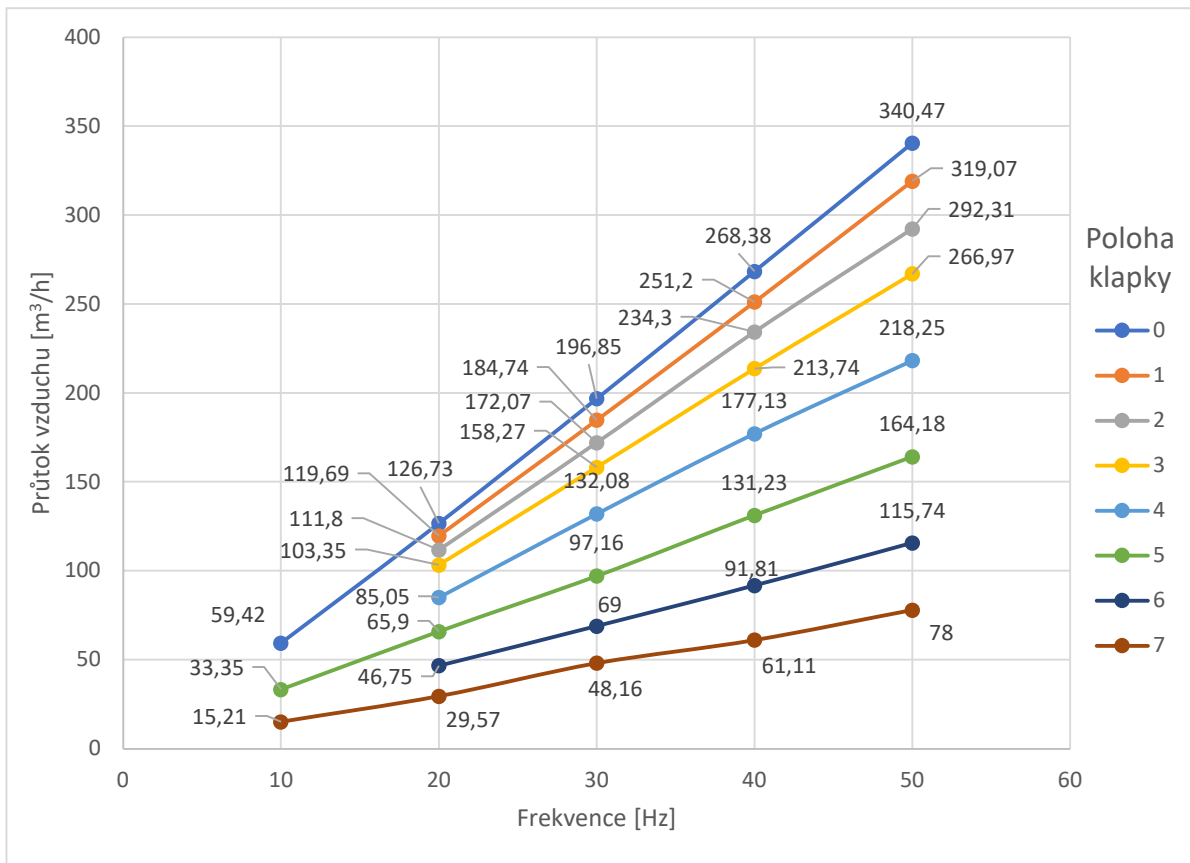
8.2 Průtok vzduchu

Ačkoliv jsme znali charakteristiku ventilátoru, bylo potřeba změřit pracovní body celého systému, vzhledem k charakteristice sušárny. Po nástřiku mlhy do sušící komory se pracovní bod systému posune, ale předpokládáme vzhledem k malému množství vstupující vody, že se tlaková ztráta téměř nezmění. Po stanovení potřebného množství sušícího vzduchu, použijeme tyto charakteristiky pro nastavení otáček ventilátoru a škrtící klapky.

8.2.1 Data z předešlých měření

V této kapitole jsou popsány a zpracovány data dodané vedoucím bakalářské práce. V datech nejsou zahrnuty vzduchové nože, protože data jsou získána pouze se zapnutým ventilátorem.

Jak již bylo uvedeno v kapitole 8.1 průtok vzduchu se dá ovládat dvěma způsoby, frekvencí resp. otáčkami, na kterou je ventilátor nastaven a škrcením průtoku vzduchu pomocí klapky zabudované do potrubí. V následujícím grafu je zobrazená závislost frekvence a klapky na průtoku vzduchu skrze sušící zařízení. Data byla naměřena za podmínek uvedených v tabulce č. 12. Otáčky ventilátoru vzhledem k nastavení systému nebyly zaznamenány. Požadovaný průtok vzduchu se reguluje hodnotou frekvence a polohou škrtícího elementu klapky.



Obr. č. 11 - Závislost průtoku vzduchu na frekvenci motoru ventilátoru a poloze škrťícího elementu klapky

| | |
|---------|---------------------------|
| Teplota | 28,1 °C |
| Vlhkost | 41,4 % |
| Hustota | 1,12 kg · m ⁻³ |

Tabulka č. 12 – Podmínky při měření

8.2.2 Ověření průtoku vzduchu

Z předchozích dodaných měření jsme dospěli k závěru, že využijeme jenom několik nastavení průtoku vzduchu. Námi použité nastavení a změřené hodnoty jsou v tabulce č. 13. Průtok vzduchu byl měřen pomocí anemometru Testo 417, měření probíhalo jednu minutu.

| | | |
|-----------------|----------|----------------------|
| Frekvence [Hz] | | 50 |
| Klapka | | 6 |
| Průtok vzduchu | | $[m^3 \cdot h^{-1}]$ |
| Bez nožů | | 109,6 |
| S noži | 5,5 baru | 122,6 |
| | 3 bary | 114,6 |
| Samostatné nože | 5,5 baru | 13 |
| | 3 bary | 4,8 |

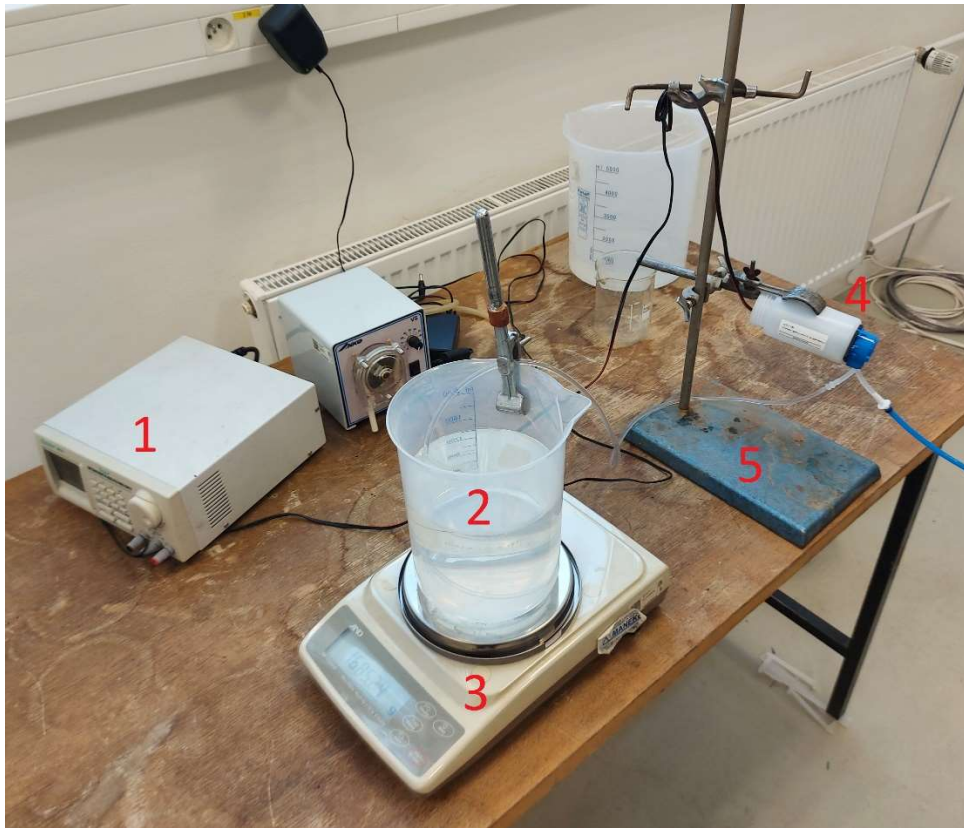
Tabulka č. 13 – Měření průtoku vzduchu

8.3 Měření průtoku vody

Následně jsme testovali čerpadla na dodání suspenze do hlavy. Měření bylo prováděno pouze s demineralizovanou vodou.

První měření bylo provedeno s peristaltickou pumpou VERDEFLEX RAPIDE R3. Měření bylo provedeno na více nastavení membrány v nebulizační hlavě (0-2 bary), ale tato pumpa byla nevhodná, proto se nám nepodařilo naměřit použitelné hodnoty.

Pro druhé měření byla použita peristaltická pumpa NKP-DC-S10B, pro zprovoznění musely být k této pumpě připojeny dráty, které byly následně napojeny na zdroj elektrické energie. Na zdroji mohla být upravena velikost napětí a tím i výkon pumpy, což nám umožnilo více kontroly nad průtokem vody tlačným skrz nebulizační hlavu. Maximální napětí pro čerpadlo bylo 12 V. Měření bylo provedeno na jednoduše zpracovaném stanovišti (obr. č. 12). Čerpadlo muselo být pevně přiděláno, jinak by poskakovalo, což ovlivňovalo jeho schopnost vytlačovat vodu. Čerpadlo bylo vloženo do tuby, která byla následně pevně připojena ke stojanu. Voda byla do nebulizační hlavy vytlačována polyuretanovými hadicemi s vnitřním průměrem 5 mm.

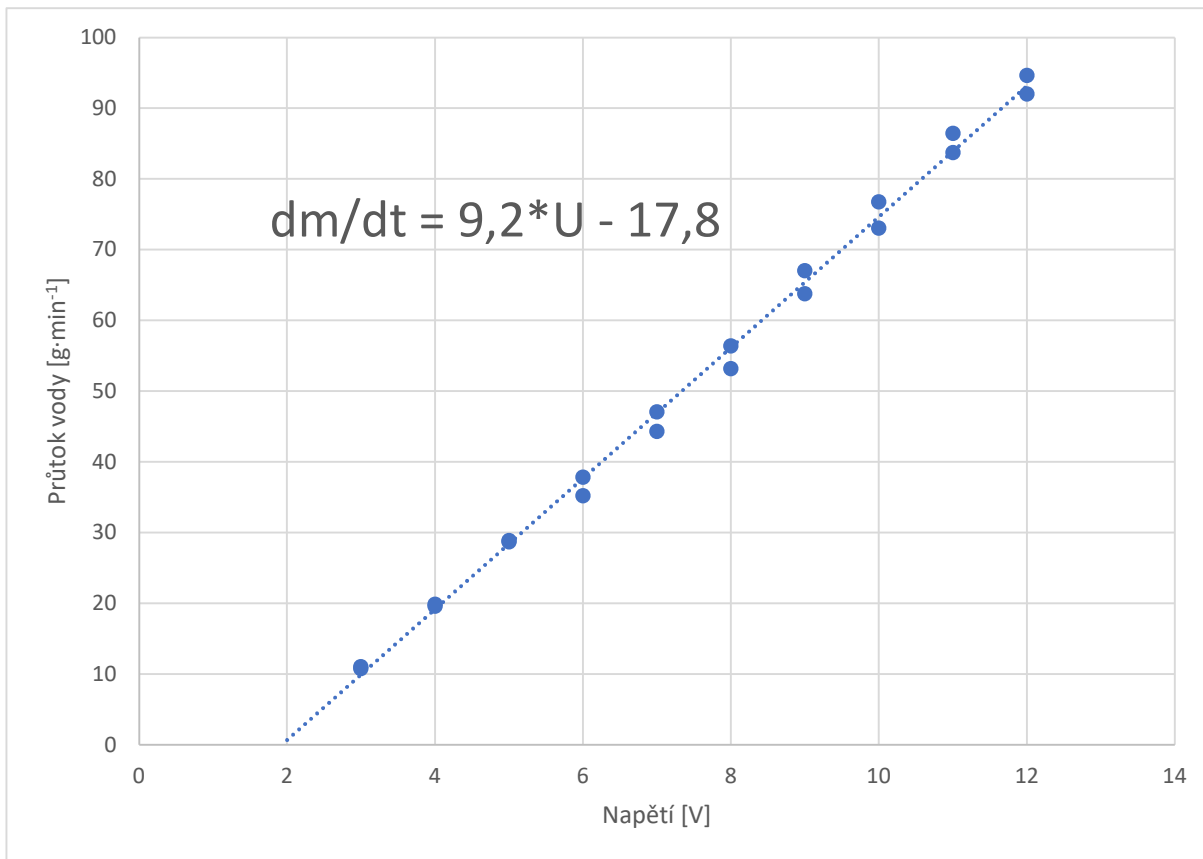


Obr. č. 12 – Měřící stanice

| | |
|----------|------------------------------------|
| 1 | Zdroj napětí Manson SDP2405 |
| 2 | Demineralizovaná voda |
| 3 | Váha AND HF-2000G |
| 4 | Peristaltické čerpadlo NKP-DC-S10B |
| 5 | Laboratorní stojan |

Tabulka č. 14 – Popis obrázku

Průtok vody byl měřen gravimetricky v minutových intervalech se zcela otevřenou membránou (tlak v membráně byl nastaven na 0 barů) v nebulizační hlavě. Zprvu jsme měřili sestupně od dvanácti voltů po jednom voltu a následně vzestupně pro ověření naměřených hodnot. Na dvou voltech jsme museli měření zastavit, protože čerpadlo nebylo dostatečně výkonné, aby protlačilo vodu skrze nebulizační hlavu.



Obr. č. 13 – Průtok vody nebulizační hlavou

8.4 Test sušení vody na sušícím zařízení

Provedli jsem tři měření s různými nastaveními průtoku vody a vzduchových nožů. V tabulce č. 15 jsou vypsaná nastavení jednotlivých měření a v tabulce č. 16 jsou hodnoty naměřené v jednotlivých měřeních. Při prvním měření byl průtok vzduchu ve vzduchovém noži příliš velký. Tento sekundární vzduch ochlazoval primární sušící vzduch a nedošlo k vysušení veškeré vody z nástřiku. V rámci prvního orientačního měření jsme neměřili (nezachytávali) množství neodsušené (vytékající) vody a tím pádem jsme nemohli provést hmotovou bilanci. Ve zbývajících dvou měřeních jsme již neodpařenou vodu zachytávali a vážili pro dokončení hmotové bilance.

| Měření | 1 | 2 | 3 |
|------------------------------|-----|----|----|
| Teplota vzduchu [°C] | 90 | 90 | 90 |
| Tlak vzduchových nožů [bary] | 5,5 | 3 | 3 |
| Napětí čerpadla [V] | 3 | 3 | 5 |
| Nastavení klapky | 6 | 6 | 6 |
| Doba měření [min] | 13 | 13 | 20 |

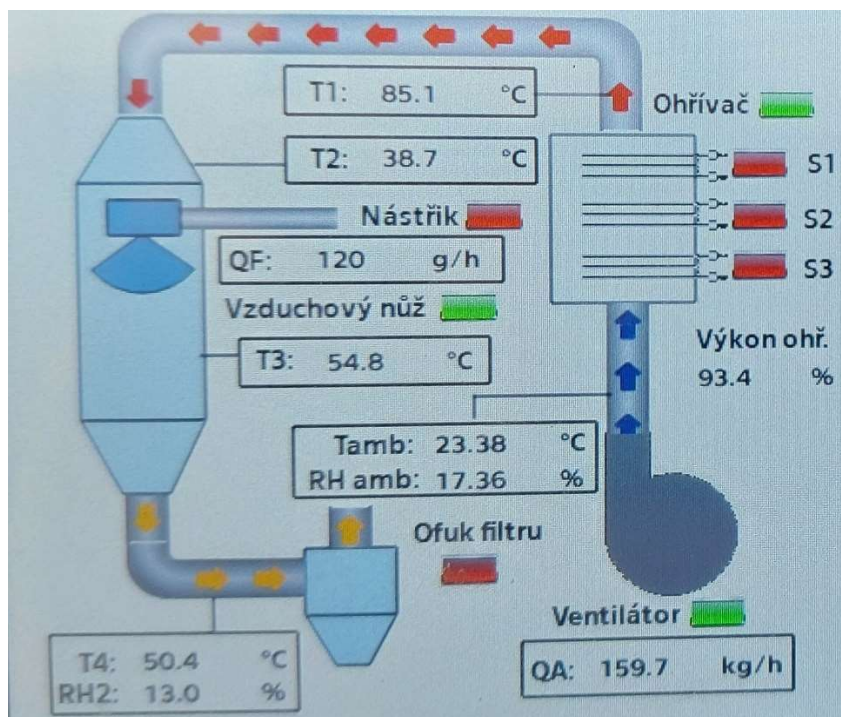
Tabulka č. 15 - Nastavení při jednotlivých měřeních

| Měření | | T_{Amb} [°C] | T_1 [°C] | T_2 [°C] | T_3 [°C] | T_4 [°C] | RH_{Amb} [%] | RH [%] | \dot{m}_{feed} [g·min ⁻¹] |
|--------|-------------------------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|-------------|--|
| 1 | Začátek (před spuštěním vody) | 23,25 | 84,1 | 67,8 | 61,9 | 40,2 | 18,76 | 5,1 | 0 |
| | Ustálený stav | 23,28 | 85,1 | 38,7 | 54,8 | 50,4 | 17,36 | 13 | 12 |
| 2 | Začátek (před spuštěním vody) | 23,07 | 84,9 | 72,9 | 66,6 | 56,3 | 14,33 | 2,4 | 0 |
| | Ustálený stav | 23,44 | 83,5 | 29,7 | 59,1 | 55,2 | 13,62 | 8,1 | 12 |
| 3 | Začátek (před spuštěním vody) | 23,57 | 86,9 | 66,7 | 65,9 | 56,7 | 13,69 | 2,6 | 0 |
| | Ustálený stav | 23,55 | 84,67 | 28,5 | 49,26 | 45,7 | 14,93 | 25 | 30 |

Tabulka č. 16 – Hodnoty jednotlivých měření

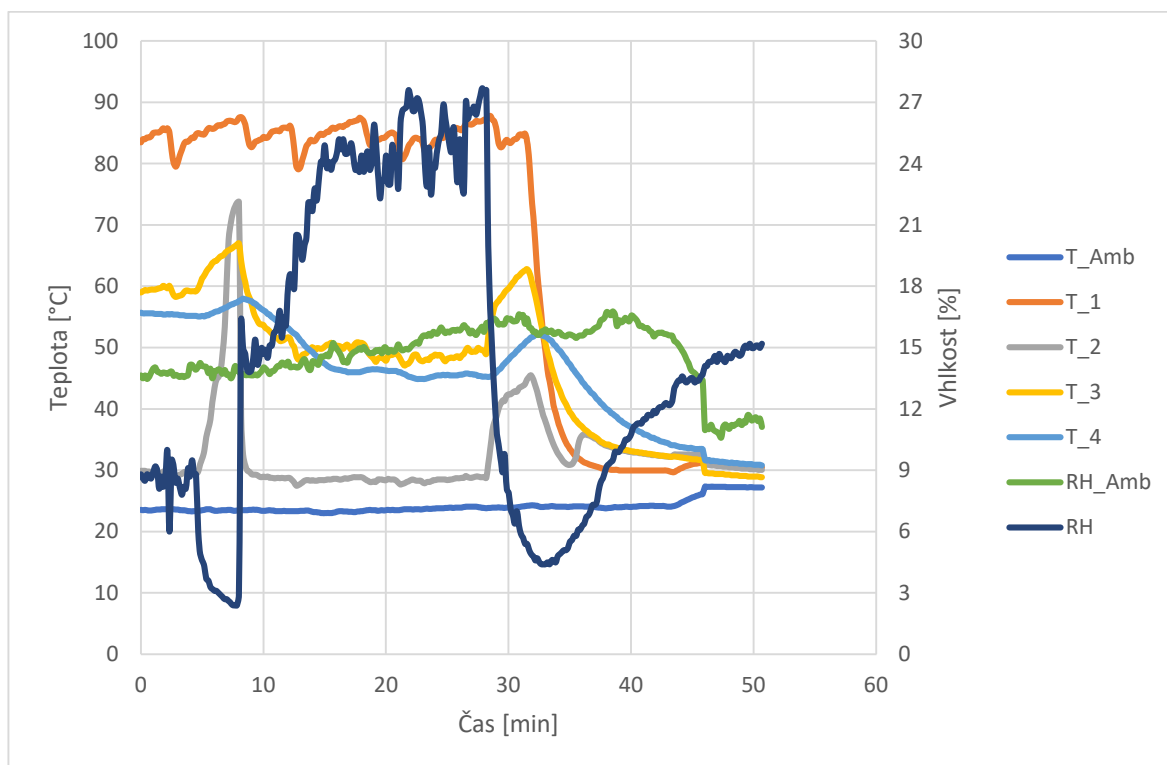
Vlhkost okolí RH_{Amb} se u každého měření zmenšuje, protože ventilátor s kalorifery byly spuštěny po celou dobu všech třech měření, při průtoku vody, ale i když jsme jen vysušovali sušicí komoru, tudíž jsme vysušovali i měřicí místnost, to lze také vidět ze stoupající teploty okolí.

Na obrázku č. 14 je vyfocena řídicí jednotka sušárny, na které je znázorněno, kde byly jednotlivé hodnoty měřeny. Hodnoty QF a QA nejsou správné. Ačkoliv byli kalorifery nastaveny na 90 °C, tak se nepodařilo vzduch ohřát na tuto hodnotu, teplota se pohybovala pouze kolem 85 °C.

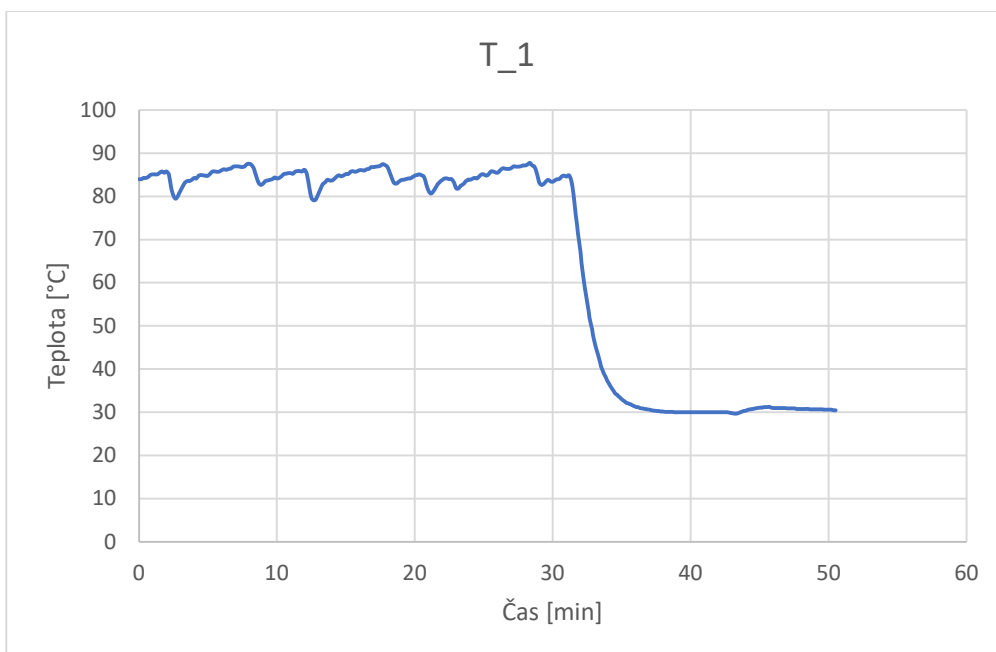


Obr. č. 14 – Schéma sušárny na ovládacím panelu

Data z měření 1 a 2 se nám nepodařilo extrahovat z řídicí jednotky, proto následující grafy využívají data pouze z **3. měření**. Na obr. č. 15 jsou vidět všechny data naměřená na sušícím zařízení. Měření začíná okolo 8. minuty, když se spustí voda.

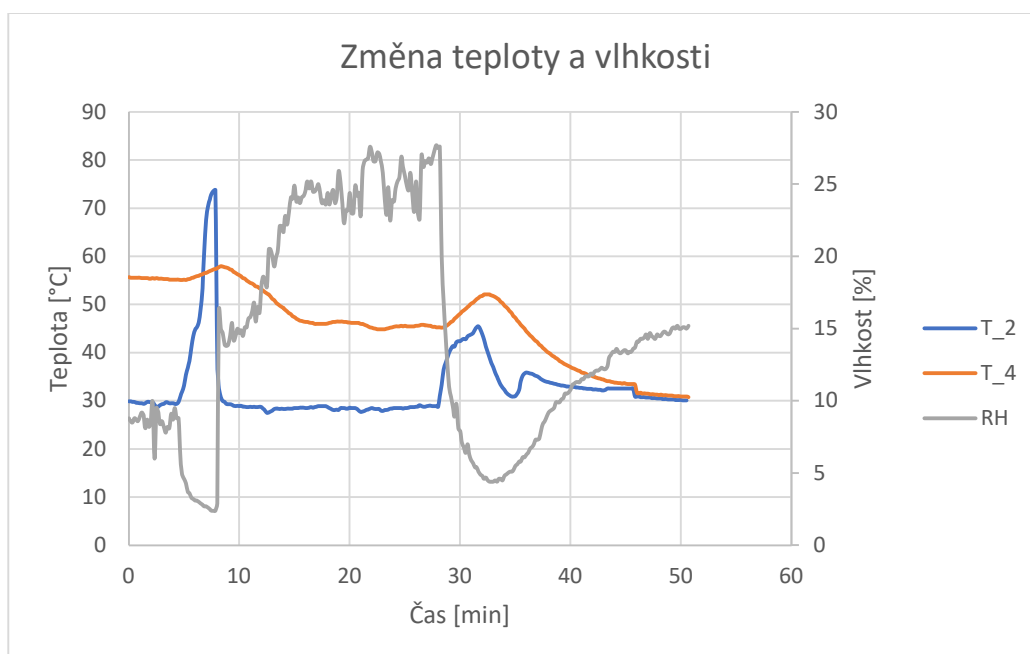


Obr. č. 15 – Naměřené hodnoty v sušárně



Obr. č. 16 – Ohřívání vstupního/sušícího vzduchu

Kolísání teploty ohříváného vstupního vzduchu je způsobené čidly, které se snaží udržet teplotu na 90 °C. Ohřívání kontroluje řídicí jednotka, která vypíná nebo zapíná kalorifery podle potřeby.



Obr. č. 17 – Změna teploty vzduchu při dotyku s demineralizovanou vodou

Na obr. č. 17 lze vidět, jak klesne teplota v sušící komoře při spuštění průtoku vody, zároveň stoupá vlhkost vzduchu, dokud se nedostane na ustálenou hodnotu kolem 25 %. Po vypnutí průtoku vody se opět zvýšila teplota a klesla vlhkost.

9. Ověřovací výpočty

Na základě vstupních dat jsme ověřili, jestli se naměřená data shodují s vypočtenými daty. Ověřovali jsme správnost měření výstupní vlhkosti vzduchu a dále jsme vypočetli dodaný tepelný výkon.

9.1 Ověření vlhkosti

Výpočet je zde podrobně popsán a na konci kapitoly je tabulka s výsledky pro 3. a 4. měření. Vlhkost jsme ověřili na základě hmotnostní bilance, kterou jsme definovali, jako rovnici (9.1), kde \dot{m}_1 byl vstupující ohřátý vzduch do sušící komory, \dot{m}_2 vstupující voda, \dot{m}_3 hmotnostní průtok vzduchových nožů a \dot{m}_4 vystupující vzduch ze sušárny.

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_3 = \dot{m}_4 \quad (9.1)$$

Dále jsme si definovali jednotlivé složky rovnice.

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_{1sv} + \dot{m}_{1H_2Op} \quad (9.2)$$

Kde \dot{m}_{1sv} je hmotnostní průtok vstupujícího suchého vzduchu a \dot{m}_{1H_2Op} hmotnostní průtok vody ve vzduchu.

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_{2H_2Ok} \quad (9.3)$$

Kde \dot{m}_{2H_2Ok} je hmotnostní průtok vstupující vody.

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_{3sv} \quad (9.4)$$

Kde \dot{m}_{3sv} je hmotnostní průtok suchého vzduchu, pro vzduchové nože jsme zanedbali vlhkost vzduchu.

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_{4sv} + \dot{m}_{4H_2Op} + \dot{m}_{4H_2Ok} \quad (9.5)$$

Kde \dot{m}_{4sv} je hmotnostní průtok vystupujícího suchého vzduchu, \dot{m}_{4H_2Op} je hmotnostní průtok vystupující vody ve vzduchu a \dot{m}_{4H_2Ok} je hmotnostní průtok vody, kterou se nepodařilo vypařit.

Následně jsme vypočetli jednotlivé složky proudů.

$$\dot{m}_1 = \dot{V}_1 \cdot \rho_{80} \quad (9.6)$$

Kde \dot{V}_1 je objemový průtok vstupujícího vzduchu a ρ_{80} je hustota vzduchu při 80 °C.

$$\dot{m}_{1H_2Op} = x_{in} \cdot \dot{m}_1 \quad (9.7)$$

Kde x_{in} je měrná vlhkost na vstupu.

$$\dot{m}_{1sv} = \dot{m}_1 - \dot{m}_{1H_2Op} \quad (9.8)$$

$$\dot{m}_{3sv} = \dot{V}_{VN} \cdot \rho_{24} \quad (9.9)$$

Kde \dot{V}_{VN} je objemový průtok vzduchových nožů a ρ_{24} je hustota vzduchu při 24 °C.

$$\dot{m}_{4sv} = \dot{m}_{1sv} + \dot{m}_{3sv} \quad (9.10)$$

$$\dot{m}_{4H_2Op} = \dot{m}_4 - \dot{m}_{1sv} - \dot{m}_{3sv} - \dot{m}_{4H_2Ok} \quad (9.11)$$

Následně pro výpočet konečné vlhkosti na výstupu RH jsme zjistili měrnou vlhkost x_{out} z rovnice (9.12).

$$x_{out} = \frac{\dot{m}_{4H_2Op}}{\dot{m}_{4sv}} \quad (9.12)$$

Pro výpočet absolutní vlhkosti jsme použili hodnoty x_{out} a T_4 a stránky <https://www.remak.eu/en/calculation-moist-air-properties>.

V tabulce č. 17 jsou všechny potřebné vstupní a vypočtené hodnoty.

| Měření | 2 | 3 |
|--|-----------------------|-----------------------|
| $\dot{V}_1 [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ | $3,04 \cdot 10^{-2}$ | $3,04 \cdot 10^{-2}$ |
| $\dot{V}_{VN} [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ | $1,33 \cdot 10^{-3}$ | $1,33 \cdot 10^{-3}$ |
| $\rho_{80} [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ | 0,9976 | 0,9976 |
| $\rho_{24} [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ | 1,188 | 1,188 |
| $x_{in} [\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}]$ | 2,426 | 2,91 |
| $\dot{m}_1 [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$ | $30,37 \cdot 10^{-3}$ | $30,37 \cdot 10^{-3}$ |
| $\dot{m}_{1H_2Op} [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$ | $7,37 \cdot 10^{-5}$ | $8,84 \cdot 10^{-5}$ |
| $\dot{m}_{1sv} [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$ | $30,3 \cdot 10^{-3}$ | $30,28 \cdot 10^{-3}$ |
| $\dot{m}_{2H_2Ok} [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$ | $21,87 \cdot 10^{-5}$ | $50,43 \cdot 10^{-5}$ |
| $\dot{m}_{3sv} [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$ | $15,84 \cdot 10^{-4}$ | $15,84 \cdot 10^{-4}$ |
| $\dot{m}_4 [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$ | $32,17 \cdot 10^{-3}$ | $32,46 \cdot 10^{-3}$ |
| $\dot{m}_{4sv} [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$ | $31,88 \cdot 10^{-3}$ | $31,87 \cdot 10^{-3}$ |
| $\dot{m}_{4H_2Ok} [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$ | $7,3 \cdot 10^{-5}$ | $15,11 \cdot 10^{-5}$ |
| $\dot{m}_{4H_2Op} [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$ | $21,93 \cdot 10^{-5}$ | $44,17 \cdot 10^{-5}$ |
| $x_{out} [\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}]$ | 6,88 | 13,86 |
| $T_4 [^\circ\text{C}]$ | 55,2 | 45,7 |
| RH – vypočtené [%] | 7,0 | 22,2 |
| RH – naměřené [%] | 8,1 | 25,0 |
| Chyba měření [%] | 13,6 | 11,2 |

Tabulka č. 17 – Vstupní a vypočtené hodnoty

$\dot{m}_{4H_2Op} = 21,93 \cdot 10^{-5}$ je přibližně $0,8 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$, to je hodinový výkon sušárny (kolik odpaří vody za hodinu) resp. bude o něco nižší, protože se nám nepodařilo odsušit všechnu nastříknutou vodu.

RH vypočtené z bilance se neshoduje s RH naměřeným z vlhkostní sondy na výstupu, to může být způsobeno zanedbáním vlhkosti vzduchu u vzduchových nožů, dále to může být způsobeno nepřesností měřících vlhkostních sond v sušícím zařízení.

9.2 Tepelná bilance

V této části jsme vypočetli potřebný celkový tepelný výkon, tepelný výkon potřebný k vysušení vody a zároveň i ztrátový výkon. Výpočet se vztahuje pouze k 3. měření.

| | | |
|---|----------------|--|
| Teplota | T_1 | 84,7 °C |
| | T_2 | 45,7 °C |
| Měrná tepelná kapacita vzduchu | c_{p45} | 1,007 kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹ |
| | c_{p84} | 1,010 kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹ |
| Zvolené c_p | c_{pzv} | 1,0085 kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹ |
| Hustota vzduchu | ρ_{45} | 1,11 kg · m ⁻³ |
| Hmotnostní průtok vzduchu na výstupu | \dot{m}_{A2} | 3,53 · 10 ⁻² kg · s ⁻¹ |
| Hmotnostní průtok odpařené vody | \dot{m}_w | 3,53 · 10 ⁻⁴ kg · s ⁻¹ |
| Výparné teplo vody | $Q_{výp}$ | 2257 kJ · kg ⁻¹ |

Tabulka č. 18 – Vstupní hodnoty

V tabulce č. 18 jsou všechny potřebné vstupní hodnoty. Ve výpočtu jsem použil zvolené c_p , které je průměrem hodnot c_{p45} a c_{p84} .

Nejprve jsme vypočetli potřebný výkon k odpaření vody \dot{Q}_L .

$$\dot{Q}_L = \dot{m}_w \cdot Q_{výp} = 3,53 \cdot 10^{-4} \cdot 2257 = 0,797 \text{ kJ} \cdot \text{s}^{-1} = 797 \text{ W} \quad (9.13)$$

Následně jsme vypočetli hmotnostní průtok vzduchu na vstupu \dot{m}_{A1} .

$$\dot{m}_{A1} = \dot{m}_{A2} - \dot{m}_w = 3,53 \cdot 10^{-2} - 3,53 \cdot 10^{-4} = 0,034947 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (9.14)$$

Z toho jsme vypočetli tepelný výkon dodaný soustavě Q .

$$\dot{Q} = \dot{m}_{A1} \cdot c_{pzv} \cdot (T_1 - T_2) = 0,034947 \cdot 1,0085 \cdot (84,7 - 45,7) = 1\,374,52 \text{ W} \quad (9.15)$$

Z těchto hodnot jsme vypočetli ztrátový výkon Q_z .

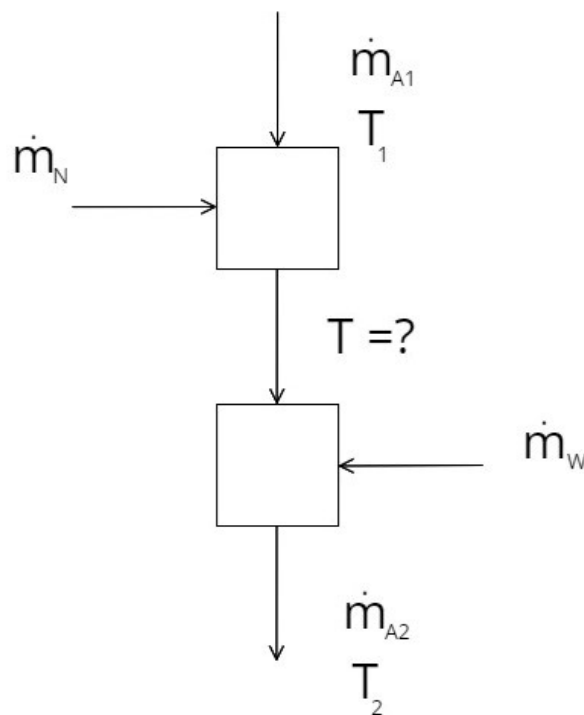
$$\dot{Q}_z = \dot{Q} - \dot{Q}_L = 1374,52 - 797 = 577,52 \text{ W} \quad (9.16)$$

9.2.1 Zpřesnění teplotní bilance

V předchozí bilanci byl zanedbán teplotní spád způsobený vzduchovými noži. V této kapitole jsem vypočítal teplotu po smíchání ohřátého vzduchu se vzduchovými noži a následně výkon dodávaný soustavě s nově vypočítanými parametry.

Využili jsme zde tedy i hmotnostní průtok vzduchových nožů $\dot{m}_N = 15,84 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, tedy jsem musel použít novou rovnici pro výpočet \dot{m}_{A1} .

$$\dot{m}_{A1} = \dot{m}_{A2} - \dot{m}_w - \dot{m}_N = 3,53 \cdot 10^{-2} - 3,53 \cdot 10^{-4} - 15,84 \cdot 10^{-4} = 0,03336 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (9.17)$$



Obr. č. 18 – Schéma bilance

Následně jsme vypočítali teplotu T , která vznikne smícháním ohřátého vzduchu \dot{m}_{A1} a vzduchových nožů \dot{m}_N . Teplota vzduchových nožů T_N je rovna teplotě okolí, $T_N = T_{Amb} = 23,55 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$T = \frac{\dot{m}_{A1} \cdot T_1 + \dot{m}_N \cdot T_N}{\dot{m}_{A1} + \dot{m}_N} = \frac{0,03336 \cdot (273,15 + 84,7) + 15,84 \cdot 10^{-4} \cdot (273,15 + 23,55)}{0,03336 + 15,84 \cdot 10^{-4}} \quad (9.18)$$

$$= 355,08 \text{ K} = 81,93 \text{ }^\circ\text{C}$$

Celkový dodaný výkon \dot{Q} se nezmění, ale dojde ke zmenšení ztrátového výkonu \dot{Q}_z .

$$\dot{Q} = \dot{m}_{A1} \cdot c_{pzv} \cdot (T_1 - T_2) = 0,034947 \cdot 1,0085 \cdot (84,7 - 45,7) = 1\,374,52 \text{ W} \quad (9.19)$$

Ztrátový výkon \dot{Q}_Z se zmenší o výkon ze vzduchových nožů \dot{Q}_N .

$$\dot{Q}_N = \dot{m}_N \cdot c_{pvz} \cdot (T - T_N) = 15,84 \cdot 10^{-4} \cdot 1,0085 \cdot (81,93 - 23,55) = 0,093 \text{ W} \quad (9.20)$$

$$\dot{Q}_Z = \dot{Q} - \dot{Q}_L - \dot{Q}_N = 1374,52 - 797 - 0,093 = 577,43 \text{ W} \quad (9.21)$$

Výkon dodaný do soustavy ze vzduchových nožů \dot{Q}_N je skoro zanedbatelný. Tento výkon je tak malý zejména kvůli malému hmotnostnímu průtoku vzduchových nožů \dot{m}_N .

10. Závěr

V rámci bakalářské práce jsem popsal způsoby výroby nanoprášek a popsal jsem jejich možné využití v potravinářském průmyslu. Na základě přečtených článků a knih jsem zhotovil tabulku, která popisuje, zda se daný způsob výroby objevuje v potravinářském, či farmaceutickém průmyslu.

V praktické části jsem zhotovil ideový návrh rozprašovací sušárny s nebulizační hlavou, pro kterou jsem na základě zadaných hodnot vytvořil hmotnostní bilanci. Z hmotnostní bilance jsem navrhl možné rozměry sušící komory.

Měření byla provedena na již postavené rozprašovací nebulizační sušárně pod dohledem vedoucího práce doc. Ing. Jana Skočilase, Ph.D. Měření probíhala pouze s demineralizovanou vodou, protože jsme provedli měření pro ustanovení sušících vlastností sušárny. Pro naměřené hodnoty jsem s pomocí vedoucího práce zhotovil hmotnostní a tepelnou bilanci. Pomocí hmotnostní bilance jsem určil nepřesnost vlhkostní sondy použité v nebulizační sušárně.

Seznam použité literatury

- [1] KHAN, Ibrahim, Khalid SAEED a Idrees KHAN. Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry* [online]. 2019, 12(7), 908-931 [cit. 2022-08-03]. ISSN 18785352. Dostupné z: doi:10.1016/j.arabjc.2017.05.011
- [2] PAN, Kang a Qixin ZHONG. Organic Nanoparticles in Foods: Fabrication, Characterization, and Utilization. *Annual Review of Food Science and Technology* [online]. 2016, 7(1), 245-266 [cit. 2022-08-09]. ISSN 1941-1413. Dostupné z: doi:10.1146/annurev-food-041715-033215
- [3] ANANDHARAMAKRISHNAN, C. a S. PARTHASARATHI, ed. Food nanotechnology: principles and applications. Boca Raton: CRC Press, [2019]. Contemporary food engineering. ISBN 9781498767170.
- [4] DIMMOCK, Matthew David. Optimisation of spray dryer with nebulisation head. *Technická 4*, 160 00, Praha 6, 2020. Diplomová práce. České vysoké učení technické, Fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky.
- [5] PARHI, Rabinarayan, Padilama SURESH a Rohit GHAN. SUPERCRITICAL FLUID TECHNOLOGY: A REVIEW. *Journal of Advanced Pharmaceutical Science And Technology* [online]. 2013, 1(1), 13-36 [cit. 2022-08-09]. ISSN 23280182. Dostupné z: doi:10.14302/issn.2328-0182.japst-12-145
- [6] COUTO, Ricardo, Victor ALVAREZ a Feral TEMELLI. Encapsulation of Vitamin B2 in solid lipid nanoparticles using supercritical CO₂. *The Journal of Supercritical Fluids* [online]. 2017, 120, 432-442 [cit. 2022-08-03]. ISSN 08968446. Dostupné z: doi:10.1016/j.supflu.2016.05.036
- [7] KHAN, Wasique H. a Virendra K. RATHOD. Process intensification approach for preparation of curcumin nanoparticles via solvent–nonsolvent nanoprecipitation using spinning disc reactor. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* [online]. 2014, 80, 1-10 [cit. 2022-08-03]. ISSN 02552701. Dostupné z: doi:10.1016/j.cep.2014.03.011
- [8] DHAND, Chetna, Neeraj DWIVEDI, Xian Jun LOH, Alice Ng JIE YING, Navin Kumar VERMA, Roger W. BEUERMAN, Rajamani LAKSHMINARAYANAN a Seeram RAMAKRISHNA. Methods and strategies for the synthesis of diverse nanoparticles and their applications: a comprehensive overview. *RSC Advances* [online]. 2015, 5(127), 105003-105037 [cit. 2022-08-09]. ISSN 2046-2069. Dostupné z: doi:10.1039/C5RA19388E
- [9] WANG, Tingting, Chunyu ZHOU, Zhonghui ZHANG, Mengde LIAO a Chufeng SUN. The impacts of operating pressure on the structural and magnetic properties of HfCo₇ nanoparticles synthesized by inert gas condensation. *Chemical Physics Letters* [online]. 2019, 721, 18-21 [cit. 2022-08-03]. ISSN 00092614. Dostupné z: doi:10.1016/j.cplett.2019.02.017
- [10] CASTRO COELHO, Sílvia, Berta NOGUEIRO ESTEVINHO a Fernando ROCHA. Encapsulation in food industry with emerging electrohydrodynamic techniques: Electrospinning and electrospraying – A review. *Food Chemistry* [online]. 2021, 339 [cit. 2022-08-03]. ISSN 03088146. Dostupné z: doi:10.1016/j.foodchem.2020.127850
- [11] KANG, Shixiong, Yiyong HE, Deng-Guang YU, Wenbing LI a Ke WANG. Drug–zein@lipid hybrid nanoparticles: Electrospraying preparation and drug extended release application. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* [online]. 2021, 201 [cit. 2022-08-03]. ISSN 09277765. Dostupné z: doi:10.1016/j.colsurfb.2021.111629

- [12] LI, Xiang, Nicolas ANTON, Cordin ARPAGAUS, Fabrice BELLETEIX a Thierry F. VANDAMME. Nanoparticles by spray drying using innovative new technology: The Büchi Nano Spray Dryer B-90. *Journal of Controlled Release* [online]. 2010, 147(2), 304-310 [cit. 2022-08-03]. ISSN 01683659. Dostupné z: doi:10.1016/j.jconrel.2010.07.113
- [13] GULATI, Shivani, M. SACHDEVA a K. K. BHASIN. Capping agents in nanoparticle synthesis: Surfactant and solvent system. *AIP Conference Proceedings* 1953 [online]. 2018 [cit. 2022-08-03]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1063/1.5032549
- [14] MITTAL, Amit Kumar, Yusuf CHISTI a Uttam Chand BANERJEE. Synthesis of metallic nanoparticles using plant extracts. *Biotechnology Advances* [online]. 2013, 31(2), 346-356 [cit. 2022-08-03]. ISSN 07349750. Dostupné z: doi:10.1016/j.biotechadv.2013.01.003
- [15] SINGH, Priyanka, Yu-Jin KIM, Dabing ZHANG a Deok-Chun YANG. Biological Synthesis of Nanoparticles from Plants and Microorganisms. *Trends in Biotechnology* [online]. 2016, 34(7), 588-599 [cit. 2022-08-03]. ISSN 01677799. Dostupné z: doi:10.1016/j.tibtech.2016.02.006
- [16] SINGH, Trepti, Shruti SHUKLA, Pradeep KUMAR, Verinder WAHLA, Vivek K. BAJPAI a Irfan A. RATHER. Application of Nanotechnology in Food Science: Perception and Overview. *Frontiers in Microbiology* [online]. 2017, 8 [cit. 2022-04-13]. ISSN 1664-302X. Dostupné z: doi:10.3389/fmicb.2017.01501
- [17] CHARCOSSET, Catherine. Preparation of nanomaterials for food applications using membrane emulsification and membrane mixing. In: *Emulsions* [online]. Elsevier, 2016, 2016, s. 37-69 [cit. 2022-08-03]. ISBN 9780128043066. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-804306-6.00002-7
- [18] SADEK, Céline, Pierre SCHUCK, Yannick FALLOURD, Nicolas PRADEAU, Cécile LE FLOCH-FOUÉRE a Romain JEANTET. Drying of a single droplet to investigate process–structure–function relationships: a review [online]. 2015, 95(6), 771-794 [cit. 2022-08-03]. ISSN 1958-5586. Dostupné z: doi:10.1007/s13594-014-0186-1