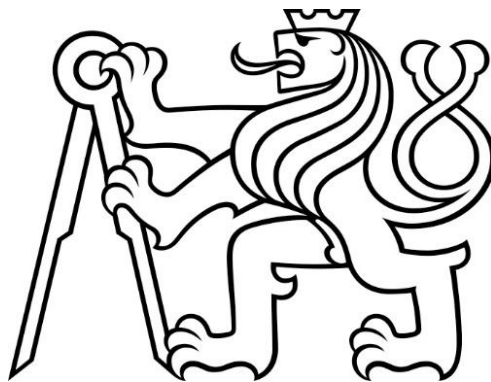


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav procesní a zpracovatelské techniky



Diplomová práce

Analýza vlivu rozmístění sušených objektů na proces sušení

Analysis of samples spatial distribution during drying process

Květen 2018

Autor: Martin Vaněk

Vedoucí práce: Ing. Jan Skočilas Ph.D.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vaněk** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **420469**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Procesní technika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Analýza vlivu rozmístění sušených objektů na proces sušení**

Název diplomové práce anglicky:

**Analysis of samples spatial distribution during drying process**

Pokyny pro vypracování:

Konvektivním sušárnám odstraňují vlhkost z materiálu prouděním teplého vzduchu okolo sušených objektů. Rozmístění objektů má ale vliv na rychlostní pole sušícího vzduchu, a tím dochází k nerovnoměrnému sušení jednotlivých vzorků v sušící komoře.

- 1) Proveďte literární rešerši ohledně procesu sušení a stanovení difuzního součinitele.
- 2) Proveďte analýzu vlivu vzdálenosti (rozteče) sušených objektů v konvektivní sušárně na kinetice sušení. Experiment proveďte na konvektivní sušárně v halových laboratořích fakulty. Vytvořte CFD model proudění vzduchu okolo sušených objektů a porovnejte výsledky modelu s experimentem.
- 3) Na základě dosažených výsledků navrhnete konvektivní sušárnu pro zadané parametry.

Seznam doporučené literatury:

- Šesták J., Žitný R.: Tepelné pochody II : výměníky tepla, odpařování, sušení, průmyslové pece a elektrický ohřev, ČVUT v Praze, 2006.  
Baker CH. J. B.: Industrial Drying of Foods, Springer US, 1997.  
Mujumdar A.S.: Handbook of Industrial Drying, Taylor and Francis Group, 2015.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

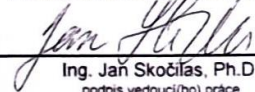
**Ing. Jan Skočilas, Ph.D., ústav procesní a zpracovatelské techniky FS**

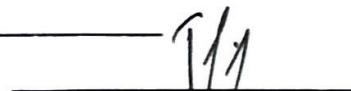
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:


Datum zadání diplomové práce: **23.04.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **08.06.2018**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

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

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

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

**30 -04- 2018**

Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne .....

.....

Martin Vaněk

## Poděkování

Vřelé díky patří vedoucímu mé práce panu Ing. Janu Skočilasovi, Ph.D. za čas strávený při konzultacích a za perfektní vedení při práci na mé diplomové práci.

Dále bych chtěl poděkovat panu MSc. Róbertovi Lexmannovi za rady a konzultace při zhotovování výpočetních programů.

## Anotace

Diplomová práce se v první části zabývá rešerší v oblasti sušení. Dále pak provedením experimentu konvektivního sušení kostek cukru, zjištěním difuzního koeficientu na základě naměřených dat a následně pomocí zjištěného difuzního koeficientu výpočtem součinitele přestupu hmoty. Dále obsahuje CFD analýzu, ze které jsou vypočtená data porovnána s výsledky měření. V předposlední části jsou pomocí CFD analýzy zkoumány změny součinitele přestupu hmoty v závislosti na distribuci měřených vzorků. Poslední část se zabývá návrhem konvektivní sušárny.

## Klíčová slova

sušení, cukr, konvektivní sušárna, difuzní koeficient, součinitel přestupu hmoty, Ansys FLUENT

## Abstract

First part of diploma thesis shows research in drying process. In the next part diffusion coefficient from obtained data from the experiment is found. With diffusion coefficient mass transfer coefficient is obtained. Next part of diploma thesis is CFD analysis and its results are compared with data from experiment. In the penultimate part, the CFD analysis changes in the mass transfer coefficient are investigated, depending on the distribution of the measured samples. In the last part convective dryer is designed.

## Key words

drying, sugar, convective dryer, diffusion coefficient, mass transfer coefficient, Ansys FLUENT

## Seznam symbolů

$A$	plocha rozhraní mezi sušeným materiálem a plynem	$[m^2]$
$A_n$	člen rovnice pro nekonečnou desku	[1]
$a_w$	aktivita vody	[1]
$B_i$	Biotovo číslo	[1]
$c_{FINAL}^m$	Hmotnostní podíl vody v kostce cukru po sušení	[%]
$c_0^m$	Hmotnostní podíl vody v kostce cukru před sušením	[%]
$c_p$	měrná tepelná kapacita	$[J/(K \cdot kg)]$
$D_{AB}$	difuzivita z látky A do látky B	$[m^2/s]$
$D_{ef}$	efektivní difuzivní součinitel	$[m^2/s]$
$D_{efW}$	efektivní difuzivní součinitel vodní páry do vzduchu	$[m^2/s]$
$D_h$	hydraulický průměr	[m]
$f$	třecí faktor	[1]
$h_{A0}$	entalpie vody před ohřátím	$[kJ/kg]$
$h_{A1}$	entalpie vody po ohřátí	$[kJ/kg]$
$H$	výška kostky cukru	[m]
$J_D$	$J_D$ faktor	[1]
$J_H$	$J_H$ faktor	[1]
$l$	charakteristická délka	[m]
$L$	délka kostky cukru	[m]
$L_x$	délka kostky cukru ve směru osy x	[m]
$m$	hmotnost jedné kostky cukru	[kg]
$m_A$	hmotnost vodní páry	$[kg_A]$
$m_B$	hmotnost suchého vzduchu	$[kg_B]$

$m_C$	hmotnost suchého materiálu	$[kg_B]$
$m_1$	hmotnost sušeného cukru	$[kg]$
$\dot{m}_A$	hmotnostní tok vysušované vlhkosti	$[kg/s]$
$M_A$	potřebné množství sušícího vzduchu	$[kg/s]$
$M_S$	množství páry na ohřátí sušícího vzduchu	$[kg/s]$
$M_W$	množství vysušené vody	$[kg/s]$
$M_1$	množství sušeného materiálu na vstupu	$[kg/s]$
$M_2$	množství vysušeného materiálu na výstupu	$[kg/s]$
$n$	mocnitel	$[1]$
$N_A$	měrná rychlost sušení	$[kg_{mat}/(kg_{sv} \cdot s)]$
$N_{Ac}$	kritická měrná rychlost sušení	$[kg_{mat}/(kg_{sv} \cdot s)]$
$Nu$	Nusseltovo číslo	$[1]$
$O$	smočený obvod	$[m]$
$p_A$	parciální tlak vodní páry	$[Pa]$
$p_A^0$	tenze par vody	$[Pa]$
$p''$	parciální tlak vodní páry nad potravinou na mezi sytosti	$[Pa]$
$p''_{H_2O}$	parciální tlak vodní páry nad hladinou kapaliny na mezi sytosti	$[Pa]$
$P$	šířka sušícího pásu	$[m]$
$Pr$	Prandtlovo číslo	$[1]$
$Q$	délka sušícího pásu	$[m]$
$Q_A$	tepelný výkon potřebný pro vysušení materiálu	$[W]$
$r$	poloměr	$[m]$
$r_{TP}$	měrné výparné teplo páry	$[kJ/kg]$
$Re$	Reynoldsovo číslo	$[1]$
$S_{cukr}$	plocha kostky cukru	$[m^2]$

$S_{pás}$	plocha sušícího pásu	$[m^2]$
$Sc$	Schmidtovo číslo	$[1]$
$St$	Stantonovo číslo	$[1]$
$Sh$	Sherwoodovo číslo	$[1]$
$t_0$	počáteční teplota vzduchu	$[°C]$
$t_1$	teplota vzduchu při ohřátí	$[°C]$
$t_2$	výstupní teplota vzduchu	$[°C]$
$U_A$	specifická vlhkost sušícího média	$[kg_{H_2O}/m_{sv}^3]$
$U_{AW}$	specifická vlhkost na fázovém rozhraní mezi vzduchem a materiálem	$[kg_{H_2O}/m_{sv}^3]$
$v$	rychlost	$[m/s]$
$W_A$	relativní hmotností zlomek vody v materiálu (vlhkost materiálu)	$[kg_{H_2O}/kg_{sv}]$
$W_{Ac}$	kritický relativní hmotností zlomek vody ve vzduchu	$[kg_{H_2O}/kg_{sv}]$
$W_{A_0}$	počáteční vlhkost materiálu	$[kg_{H_2O}/kg_{sv}]$
$W_{A\tau}$	vlhkost materiálu v čase $\tau$	$[kg_{H_2O}/kg_{sv}]$
$W_{eq}$	rovnovážná vlhkost materiálu	$[kg_{H_2O}/kg_{sv}]$
$W_{FINAL}$	vlhkost materiálu po sušení	$[kg_{H_2O}/kg_{sv}]$
$\overline{W}_A$	průměrná vlhkost materiálu	$[kg_{H_2O}/kg_{sv}]$
$x$	osa v Kartézském souřadném systému	$[m]$
$x_{A0}$	měrná vlhkost vzduchu před ohřátím	$[kg_{H_2O}/kg_{sv}]$
$x_{A1}$	měrná vlhkost vzduchu po ohřátí	$[kg_{H_2O}/kg_{sv}]$
$x_{A2}$	měrná vlhkost vzduchu výstupní	$[kg_{H_2O}/kg_{sv}]$
$y$	osa v Kartézském souřadném systému	$[m]$



## Seznam řeckých symbolů

$\alpha$	součinitel přestupu tepla	$[W/(m^2K)]$
$\alpha_{COR}$	součinitel přestupu tepla – korelační řešení	$[W/(m^2K)]$
$\alpha_{ANSYS}$	součinitel přestupu tepla – původní kanál	$[W/(m^2K)]$
$\alpha_{ANSYS_0}$	součinitel přestupu tepla – kostky bez mezer	$[W/(m^2K)]$
$\alpha_{ANSYS_1}$	součinitel přestupu tepla – základní mezery	$[W/(m^2K)]$
$\alpha_{ANSYS_1,25}$	součinitel přestupu tepla – 1,25x větší mezery	$[W/(m^2K)]$
$\alpha_{ANSYS_1,5}$	součinitel přestupu tepla – 1,5x větší mezery	$[W/(m^2K)]$
$\alpha_{ANSYS_1,75}$	součinitel přestupu tepla – 1,75x větší mezery	$[W/(m^2K)]$
$\alpha_{ANSYS_2}$	součinitel přestupu tepla – 2x větší mezery	$[W/(m^2K)]$
$\beta$	součinitel přestupu hmoty	$[m/s]$
$Bi_m$	Biotovo číslo pro přestup hmoty	[1]
$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti	$[W/(mK)]$
$\mu$	dynamická viskozita	$[Pa \cdot s]$
$\mu_n$	kořeny charakteristické rovnice	[1]
$\nu$	kinematická viskozita	$[m^2/s]$
$\rho$	hustota	$[kg/m^3]$
$\rho_m$	hustota kostky cukru	$[kg/m^3]$
$\tau$	čas	[s]
$\varphi_A$	relativní vlhkost vzduchu	[1]
$\varphi_0$	relativní vlhkost vstupujícího vzduchu	[1]
$\Phi_A$	intenzita hmotnostního toku vlhkosti	$[kg/(m^2s)]$
$\Phi_{Ac}$	kritická intenzita hmotnostního toku vlhkosti	$[kg/(m^2s)]$

## Obsah

Poděkování.....	2
Anotace .....	3
Klíčová slova .....	3
Abstract.....	3
Key words.....	3
Seznam symbolů .....	4
Seznam řeckých symbolů .....	7
Úvod .....	1
1. Sušení .....	2
1.1 Fáze sušení .....	3
1.2.1 První fáze.....	3
1.2.2 Druhá fáze .....	3
1.2.3 Třetí fáze .....	3
1.2 Základní vztahy využívané při sušení .....	4
1.3 Aktivita vody.....	5
1.4 Kinetika konvektivního sušení.....	6
Vsádková periodická konvektivní sušárna [2].....	7
Shrnutí.....	11
2. Sušárny.....	12
2.1. Základní druhy sušáren .....	12
Rotační bubnová sušárna.....	12
Fluidní sušárna .....	13
Rozprašovací sušárna.....	13
Proudová sušárna .....	14
Komorová sušárna .....	14
Mikrovlňná sušárna.....	14
Konvektivní sušárna .....	14
3. Sušení v potravinářském průmyslu.....	15
3.1 Metody sušení v potravinářském průmyslu.....	15
Sluneční sušení.....	15
Konvektivní sušení .....	16
Radiační sušení (mikrovlňné) .....	17

Sušení mrazem – lyofilizace .....	18
Osmotické sušení (osmotické dehydratace potravin) .....	19
Shrnutí.....	19
4. Nestacionární konvektivní přenos hmoty z kostky cukru do sušícího vzduchu .....	20
4.1 Řešení rovnice přenosu hmoty .....	20
4.2 Zjednodušené analytické řešení.....	22
4.3 Numerické řešení .....	23
5. Analogie mezi přenosem tepla a hmoty .....	25
6. Shrnutí teoretické části a následný postup .....	28
6.1 Shrnutí teoretické části .....	28
6.2 Následný postup .....	28
7. Metodika řešení v programu ANSYS .....	30
7.1 Geometrie a fyzikální vlastnosti látek .....	30
7.2 Postup v programu ANSYS .....	33
7.3 Výsledky výpočtu pro 2 m/s .....	34
8. Výpočet součinitele přestupu tepla pomocí korelace .....	39
9. Laboratorní měření .....	41
9.1 Příprava měření.....	41
9.2 Měření.....	44
9.3 Vyhodnocení měření .....	44
10. Výpočty z měření .....	46
10.1 Výpočet difuzního koeficientu $Def$ analytickou metodou .....	46
10.2 Výpočet difuzního koeficientu $Def$ numerickou metodou.....	47
10.3 Výpočet součinitele přestupu hmoty $\beta$ .....	49
11. Změny vzdálenosti kostek.....	51
11.1 Minimalizace vzdáleností mezi kostkami .....	52
11.2 Původní rozestavení .....	54
11.3 Zvětšení vzdálenosti 1,25x.....	56
11.4 Zvětšení vzdálenosti 1,5x.....	58
11.5 Zvětšení vzdálenosti 1,75x.....	60
11.6 Dvojnásobné zvětšení vzdálenosti.....	62
11.7 Výpočet součinitele přestupu hmoty .....	64
12. Porovnání výsledných hodnot .....	65

13.	Návrh pásové konvektivní sušárny .....	67
13.1	Základní výpočty .....	67
13.2	Rozměrový návrh sušárny .....	69
14.	Závěr.....	70
Zdroje:	.....	71

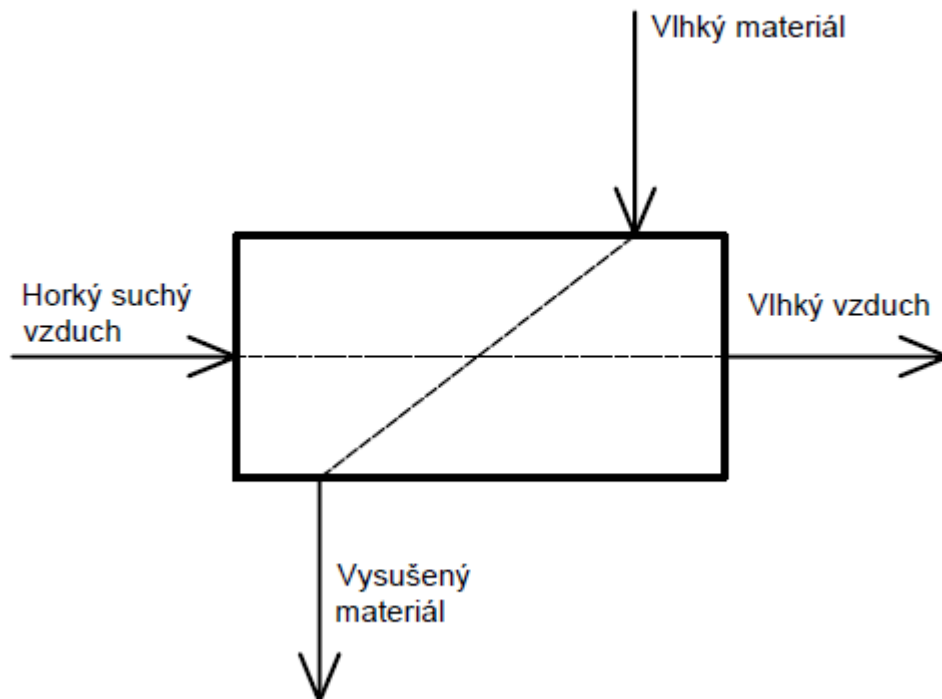
# Úvod

Diplomová práce pojednává o konvektivním sušení cukru. Nejprve se zabývá rešerší v oblasti sušení, co sušení je, jaké má fáze a průběh. Součástí rešerše je dále kinetika konvektivního sušení. Jsou zde popsány základní druhy sušáren a vybrané metody sušení používané v potravinářském průmyslu. Rešeršní část dále obsahuje i možnost řešení druhého Fickova zákona pro konvektivní sušení kostek cukru. Je zde odvozena Chilton-Colbournova analogie, tedy analogie mezi přestupem tepla a hmoty, pomocí které je součinitel přestupu tepla přepočten na součinitel přestupu hmoty. Další části diplomové práce se již zabývají řešením konkrétního případu sušení dvaceti kostek cukru v konvektivní sušárně s danými rozestupy. Nejprve byla provedena simulace sušení v programu ANSYS Fluent se základními rozestupy kostek. Z této simulace byl zjištěn součinitel přestupu tepla. Dále pak byl proveden analytický výpočet součinitele přestupu tepla za pomoci korelace pro proudění okolo desky. Výsledné hodnoty byly porovnány a model byl uznán za vhodný. Následně je zde popsán průběh laboratorních měření i s jejich vyhodnocením. Dále je v diplomové práci uveden výpočet difuzního koeficientu za pomoci druhého Fickova zákona a jeho řešení. Řešení uvedené v rešeršní části bylo svými výsledky nevyhovující, proto byla zvolena jiná metoda, která je v diplomové práci popsána. Po získání difuzního koeficientu byly dopočteny součinitele přestupu hmoty. Následující část diplomové práce se zabývá vlivem změny vzdáleností mezi kostkami na součinitel přestupu hmoty. To vše za pomoci CFD simulací v programu ANSYS Fluent. Při první změně rozložení kostek došlo k jejich položení co nejblíže k sobě, tudíž kostky byly v simulaci uvažovány jako jedna velká deska. Další rozložení bylo 1,25x, 1,5x, 1,75x a 2x větší oproti původní vzdálenosti kostek. Pomocí simulace opět byly zjištěny součinitele přestupu tepla a za pomoci Chilton-Colbournovy analogie, odvozené v rešeršní části, byly součinitele přestupu tepla přepočteny na součinitele přestupu hmoty a výsledky porovnány. Poslední část diplomové práce se zabývá návrhem konvektivní sušárny za použití vypočtených a naměřených hodnot.

# 1. Sušení

Sušení je děj (příklad sušení proudem vzduchu na obr. 1), při kterém dochází k odstranění kapaliny z materiálu – dochází tedy k jeho vysoušení. Při sušení dochází k přenosu hmoty a přestupu tepla, jde o difuzní proces, ze sušeného materiálu je kapalina odváděna do sušícího média na základě rozdílu koncentrací. Voda, která je na povrchu materiálů, v průběhu sušení přechází do proudu sušícího média – vnější difuze a voda, která je obsažena v samotném objemu materiálu, poté postupně difunduje k povrchu sušeného materiálu – vnitřní difuze.

[1]



Obr.1 Sušení proudem vzduchu

## 1.1 Fáze sušení

### 1.2.1 První fáze

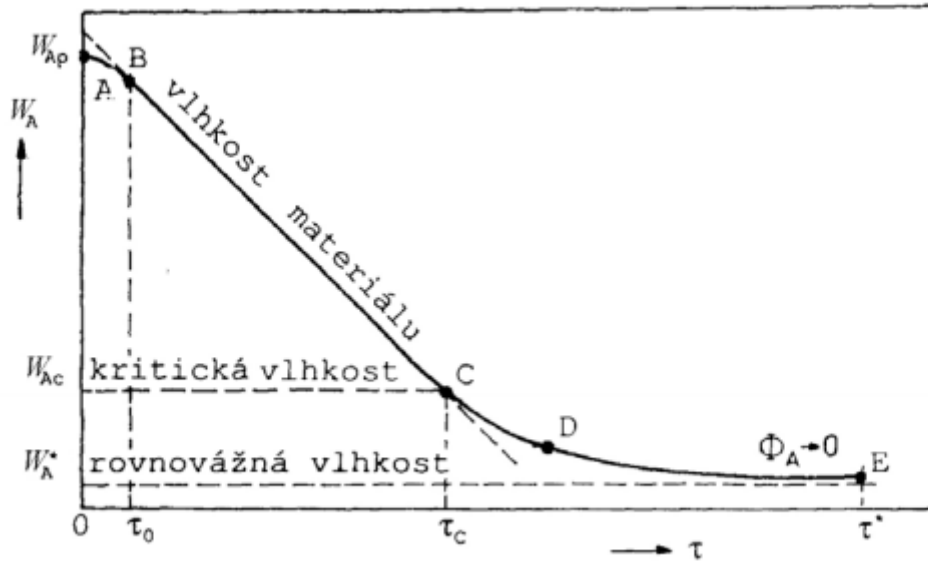
V první fázi sušení dochází k ohřívání sušeného materiálu z počáteční teploty na teplotu mokrého teploměru. Z povrchu se začne odpařovat vlhkost do sušícího média, koncentrace vody v materiálu začne klesat. Dle obr. 2 tento proces probíhá od bodu A do bodu B. Odpařování povrchové vody zpomaluje proces ohřívání materiálu, protože teplo dodávané sušícím médiem je spotřebováváno právě na odpařování povrchové vody. První fáze sušení je velmi krátká. [1]

### 1.2.2 Druhá fáze

Druhá fáze dle obr. 2 začíná v bodu B a končí v bodu C. V bodu B dosáhl povrch materiálu teploty vlhkého teploměru. Všechno teplo přiváděné k materiálu je spotřebováváno na odpařování vody z povrchu sušeného materiálu, teplota materiálu se tedy nemění. Voda, která se odpařuje ze sušeného materiálu, se nazývá volná (nevázaná). V druhé fázi je rychlost sušení konstantní. V bodu C sušící křivky je hodnota vlhkosti materiálu stejné jako hodnota kritické vlhkosti. V druhé fázi sušení rychlost sušení závisí na rychlosti proudění sušícího média, jeho vlhkosti a teplotě. Ovšem nezávisí na výšce vrstvy a okamžité vlhkosti materiálu. [1]

### 1.2.3 Třetí fáze

Třetí fáze sušení nastává v bodu C, kdy je ze sušeného materiálu odpařena veškerá volná voda a vzduch již přichází do styku se sušeným materiálem. Již dochází k ohřívání materiálu a ke snížení rychlosti sušení. Teplota materiálu stoupne nad teplotu mokrého teploměru. Nyní začíná difundovat voda, která se nachází v objemu materiálu, přechází na povrch a difunduje do sušícího média. Dále pokračuje sušení do bodu E, kde se teplota materiálu blíží teplotě sušícího vzduchu a vlhkost materiálu je téměř rovna rovnovážné vlhkosti. Materiál obsahuje již pouze vázanou vodu, která se dá odstranit dalšími metodami. [1]



Obr. 2 – fáze sušení [1]

## 1.2 Základní vztahy využívané při sušení

Složka A – vodní páry

Složka B – suchý vzduch

Složka C – suchý materiál

Relativní vlhkost vzduchu [2]:

$$\varphi_A = \frac{p_A}{p_A^0} \quad (1)$$

Relativní vlhkost udává poměr parciálního tlaku vodní páry  $p_A$  k tenzi par vody  $p_A^0$

Měrná vlhkost vzduchu [2]:

$$\chi = \frac{m_A}{m_B} \quad (2)$$

Poměr hmotnosti vodní páry a suchého vzduchu.

Relativní hmotností zlomek vlhkosti v sušeném materiálu [2]:

$$W_A = \frac{m_A}{m_C} \quad (3)$$



Intenzita hmotnostního toku vlhkosti – rychlost sušení [2]:

$$\Phi_A = \frac{d^2m}{dAd\tau} \quad (4)$$

Tuto rovnici lze vyjádřit rovnicí přestupu hmoty v plynné fázi [2]:

$$\Phi_A = \beta(U_{AW} - U_A) \quad (5)$$

$U_A$  – specifická vlhkost sušícího média

$U_{AW}$  – specifická vlhkost plynu těsně nad povrchem materiálu

### 1.3 Aktivita vody

Celkový obsah vody neurčuje odolnost potravin proti mikroorganismům a také neurčuje rychlost, kterou probíhají biochemické a chemické reakce v potravině. Určujícím faktorem je dostupnost vody. Dostupnost vody souvisí s interakcí mezi vodou a potravinou – silou chemických a fyzikálních vazeb vody na potravinu, přítomností rozpuštěných látek a tak dále. Mírou dostupnosti vody v potravině je právě aktivita vody  $a_w$ . [3] [5]

Aktivita vody je definována jako poměr parciálního tlaku vodní páry nad potravinou ku parciálnímu tlaku vodní páry čisté vody za určité teploty. Pokud je potravina v rovnovážném stavu s okolím, aktivita vody odpovídá rovnovážné relativní vlhkosti vzduchu. [5]

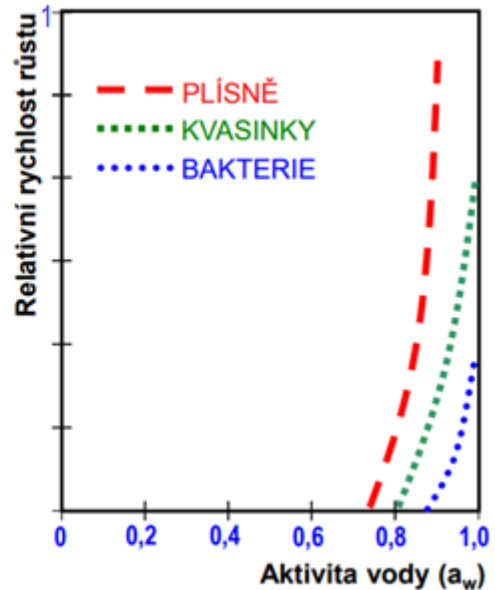
Výpočet aktivity vody [3]:

$$a_w = \frac{p''}{p''_{H_2O}} = \frac{\varphi}{100} \quad (6)$$

mikroorganismy	aktivita vody ( $a_w$ )
bakterie	0,91
kvasinky	0,88
plísně	0,80
halofilní bakterie	0,75
xerofilní plísně	0,65
osmofilní kvasinky	0,60

**Množství vody dostupné pro mikroorganismy...**

**AKTIVITA VODY JE URČUJÍCÍM FAKTOREM ÚDRŽNOSTI POTRAVINY...**



Obr. 3 – aktivita voda [3]

Obr. 3 udává hodnoty aktivity vody např. v potravinách, při kterých již dochází k růstu nežádoucích (nebo dokonce patogenních) mikroorganismů. Dále obr. 3 udává závislost rychlosti růstu mikroorganismů na aktivitě vody, tedy je patrné, že „tempo“ růstu je vysoké v malém rozsahu hodnot  $a_w$  po překročení určité limitní hodnoty.

## 1.4 Kinetika konvektivního sušení

Při základních výpočtech kinetiky konvektivní sušení uvažujeme velké množství sušícího média – vlhkost v sušícím médiu  $U_A$  se nemění. Intenzita hmotnostního toku vlhkosti – rychlost sušení, jak již bylo zmíněno ve vztahu (5), lze vypočítat následujícím vztahem [2]:

$$\Phi_A = \frac{\dot{m}_A}{A} = \beta(U_{AW} - U_A) \quad (7)$$

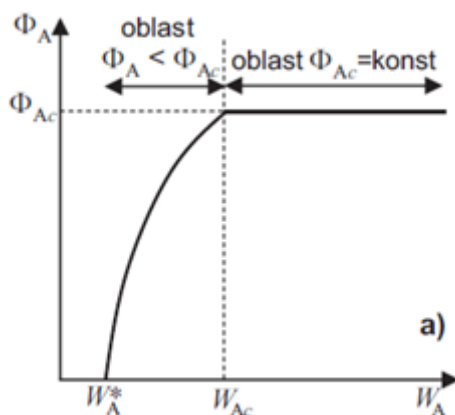
$\dot{m}_A$  – hmotnostní tok vysušované vlhkosti

$A$  – plocha rozhraní mezi sušeným materiálem a plynem

$U_A$  – specifická vlhkost vzduchu

$U_{AW}$  – specifická vlhkost plynu těsně nad povrchem materiálu

Právě rozdíl vlhkostí ( $U_{AW} - U_A$ ) je hybnou silou sušícího procesu. Zvětšením plochy  $A$  lze výrazně zvýšit hmotnostní tok vysušované vlhkosti  $\dot{m}_A$ , ovšem rychlost sušení se tím nezmění. [2]



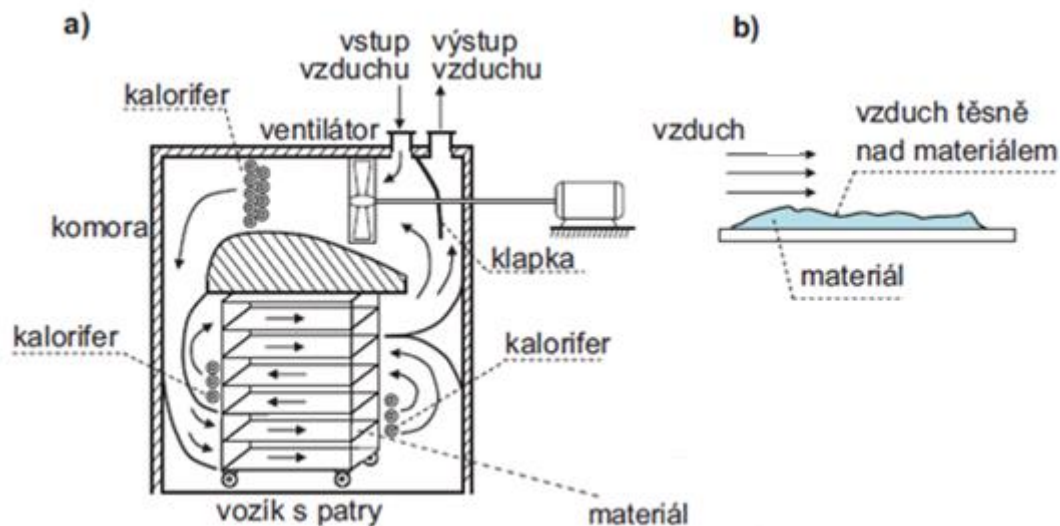
Obr. 4 – Závislost rychlosti sušení  $\Phi_A$  na relativním hmotnostním zlomku vody ve vzduchu (zkráceně - vlhkosti materiálu)  $W_A$ . [2]

Pokud je materiál dostatečně vlhký a vzduch těsně u povrchu je nasycený vlhkostí, je hybná síla ( $U_{AW} - U_A$ ) konstantní a tím pádem je konstantní i  $\Phi_{Ac}$  (obr. 4). Intenzitu hmotnostního toku vlhkosti  $\Phi_{Ac}$  nazýváme kritickou nebo konstantní. Tato kritická intenzita hmotnostního toku sušení nastává pro vlhkosti materiálu vyšší než je hodnota  $W_{Ac}$ , tento symbol lze nazvat kritický relativní hmotnostní zlomek vody ve vzduchu. [2]

### Vsádková periodická konvektivní sušárna [2]

Do vsádkové periodické konvektivní sušárny je sušený materiál dávkován periodicky, sušící plyn protéká zařízením kontinuálně. Na rozdíl od kontinuální sušárny, kde v ustáleném stavu vlhkost a entalpie nezávisí na čase, v sušárně vsádkové tyto hodnoty na čase závisí.

Další část diplomové práce se zabývá bilancí a dobou sušení vlhkého materiálu, pro zjednodušení předpokládáme, že se teplota  $t$ , střední vlhkost sušícího plynu  $U_A$  a koeficient přestupu hmoty  $\beta$  podél sušeného materiálu v průběhu sušení nemění, vzhledem k velkému průtoku sušícího média. Obrázek 6 zobrazuje komorovou vsádkovou sušárnu s částečným recyklem vzduchu. V této sušárně je vzduch ohříván v hlavním ohřivači (kaloriferu) a dále také v ohřivačích vedlejších, které jsou umístěny okolo patrového stojanu pro sušení materiálu. [2]



Obr. 5 – a) Komorová vsádkové sušárna. b) Schéma sušení materiálu ve vsádkové sušárně [2]

V průběhu sušení se počáteční vlhkost  $W_{A0}$  postupně sníží na konečnou vlhkost  $W_{A\tau}$ .

Je tedy možné vypočítat celkové množství odpařené vody vztahem:

$$\Delta m_A = m_C(W_{A0} - W_{A\tau}) \quad (8)$$

Dále předpokládáme, že se rychlost sušení (intenzita hmotnostního toku vlhkosti)  $\Phi_A$  podél sušeného materiálu nemění. Můžeme tedy poté zapsat bilanci hmotnosti vlhkosti v materiálu  $m_A$ .

Přičemž lze dosadit  $m_A = m_C W_A$ . Bilance bude tedy vypadat následovně:

$$\frac{dm_A}{dt} = -\dot{m}_A \quad (9)$$

$$\frac{d(m_C W_A)}{d\tau} = -\Phi_A A \quad (10)$$

Kde:

$\tau$  – čas

$\dot{m}_A = \Phi_A A$  – okamžitý hmotnostní tok odpařované vody z materiálu

$m_C$  – hmotnost sušiny (během odpařování se nemění)

Rovnici lze dále upravit do tvaru:

$$-\frac{dW_A}{d\tau} = -\Phi_A \left( \frac{A}{m_C} \right) \quad (11)$$

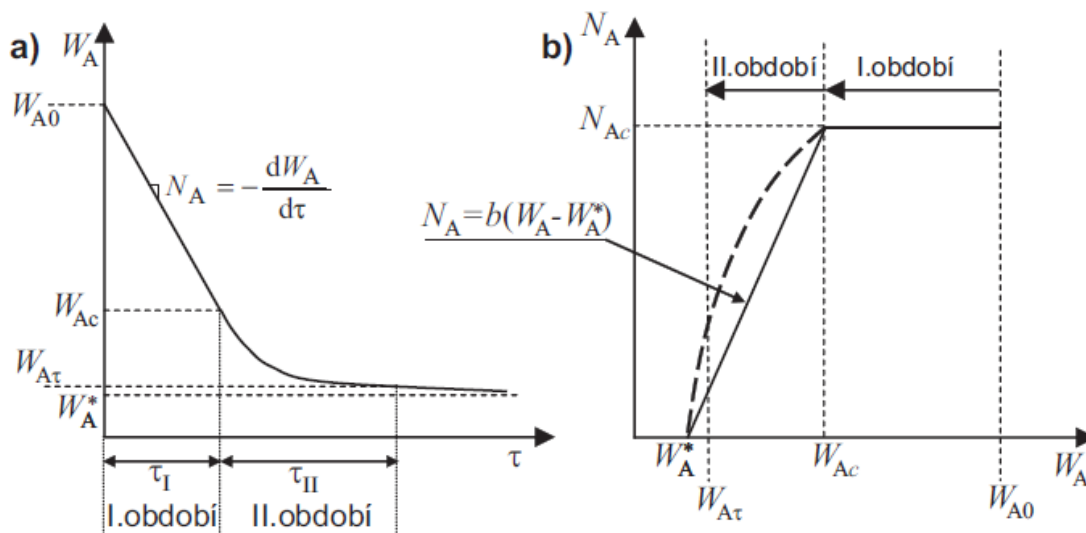
První člen předchozí rovnice se nazývá měrná rychlost sušení:

$$N_A = -\frac{dW_A}{d\tau} \quad (12)$$

Poslední člen rovnice (11) se nazývá měrný povrch sušeného materiálu:

$$a_C = \left( \frac{A}{m_C} \right) \quad (13)$$

Při zanedbání ustavování teploty na počátku sušení, typický časový vývoj vlhkosti materiálu  $W_A(t)$  ve vsádkové sušárně odpovídá obrázku 6a. V první fázi sušení je pokles vlhkosti materiálu lineární, tedy pro  $W_A > W_{A_c}$ , vzhledem k tomu, že sušení probíhá konstantní rychlostí. V druhém období již tato lineární závislost neplatí a rychlost sušení se zpomaluje. [2]



Obr. 6 – Sušící křivky: a) Časový vývoj vlhkosti materiálu  $W_A(t)$  ve vsádkové sušárně. b) Závislost měrné rychlosti sušení  $N_A$  na vlhkosti materiálu  $W_A$ , dva různé průběhy  $N_A(W_A)$  pro  $W_A < W_{Ac}$  [2]

Na obr. 6.b je možno vidět zlom, který nastává pokud se vlhkost materiálu  $W_A$  dostane pod kritickou vlhkost materiálu  $W_{Ac}$ . Měrná rychlost sušení klesá k nule s blížící se hodnotou vlhkosti materiálu  $W_A^*$ , to je rovnovážná vlhkost sušeného materiálu v porovnání se sušícím plynem [2].

Pro návrh sušárny je vhodné naměřit pro daný materiál a dané vlastnosti sušícího plynu sušící křivku. Dobu sušení v první části sušení dle obr. 6.a. lze spočítat následujícím postupem [2]:

$$N_{Ac} = -\frac{dW_A}{d\tau} \quad (14)$$

Separací proměnných a integrací rovnice měrné doby sušení z počáteční do konečné vlhkosti ( $W_{A0} \rightarrow W_{A\tau}$ ) získáme dobu sušení v prvním období  $\tau_I$ :

$$\int_0^{\tau_I} d\tau = -\frac{1}{N_{Ac}} \int_{W_{A0}}^{W_{A\tau}} dW_A \quad (15)$$

Tento vztah lze upravit následovně:

$$\tau_I = \frac{W_{A0} - W_{A\tau}}{N_{Ac}} = \frac{m_C(W_{A0} - W_{A\tau})}{\beta A(U_{Aw} - U_A)} \quad (16)$$

Pokud sušení probíhá pouze ve druhém období, tedy při  $W_{A_0} \leq W_{A_c}$ , pak lze dobu sušení  $\tau_{II}$  spočítat následovně:

$$\tau_{II} = - \int_{W_{A_0}}^{W_{A_\tau}} \frac{dW_A}{N_A} = \int_{W_{A_\tau}}^{W_{A_0}} \frac{dW_A}{N_A} \quad (17)$$

Tento integrál lze vypočítat numericky na základě naměřené závislosti  $N_A(W_A)$  tak, jak je zobrazeno na 67.b. Nebo lze závislost ve druhém sušícím období aproximovat přímkou se směrnici  $b$ , která prochází počátečními a konečnými souřadnicemi druhé fáze sušení.

$$N_A = b(W_A - W_A^*) = N_{A_c} \frac{W_A - W_A^*}{W_{A_c} - W_A^*} \quad (18)$$

Po dosažení z předchozích vztahů získáme pro dobu sušení v druhém období následující vztah:

$$\tau_{II} = \frac{W_{A_c} - W_A^*}{N_{A_c}} \int_{W_{A_\tau}}^{W_{A_0}} \frac{dW_A}{W_A - W_A^*} = \frac{W_{A_c} - W_A^*}{N_{A_c}} \ln \frac{W_{A_0} - W_A^*}{W_{A_\tau} - W_A^*} \quad (19)$$

Pokud tedy chceme vypočítat čas, po který je materiál sušený v obou fázích, časy jednotlivých fází je možnost sečíst:

$$\tau = \tau_I + \tau_{II} = \frac{1}{N_{A_c}} \left[ (W_{A_0} - W_{A_c}) + (W_{A_c} - W_A^*) \ln \frac{W_{A_c} - W_A^*}{W_{A_\tau} - W_A^*} \right] \quad (20)$$

## Shrnutí

V této části diplomové práce byly objasněny základní pojmy sušení, a ukázán příklad kinetiky konvektivního sušení v periodické konvektivní sušárně. Pro řešení problému bude tedy nutné naměřit sušící křivku pro daný materiál obtékaný vzduchem.

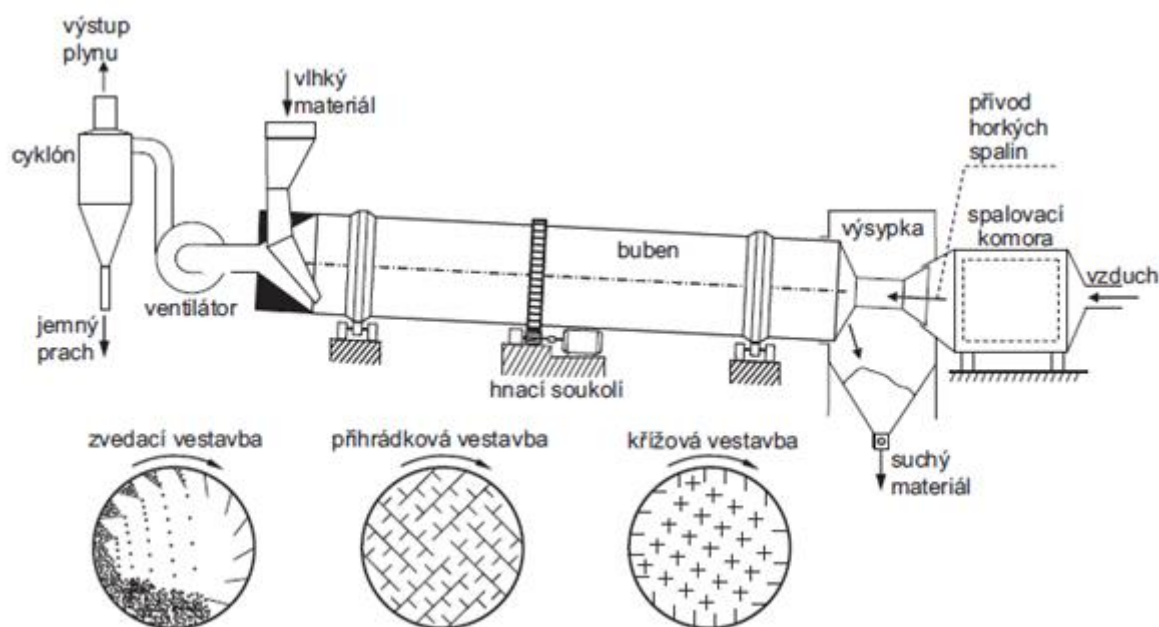
## 2. Sušárny

Jedním z cílů práce je návrh sušárny. Tato kapitola se zabývá základním přehledem sušáren ve zpracovatelském průmyslu.

### 2.1. Základní druhy sušáren

#### Rotační bubnová sušárna

Rotační bubnová sušárna je kontinuální sušárna (viz. obr. 7), jejíž hlavní částí je pomalu otáčející se buben, mírně skloněný, nejčastěji o průměru 2-3 metry. Na vnějším obvodu bubnu je uloženo ozubené kolo, za pomoci tohoto kola se buben otáčí. Konce bubnu jsou uchyceny pouze ve vodících kladkách. Díky sklonu bubnu se materiál postupně přesouvá od jeho horní části k dolní, v průběhu přesouvání se buben otáčí a dochází tak k prosoušení materiálu. Sušící médium, které prošlo sušárnou, je nutno filtrovat od unesených částic. Tento typ sušárny se používá pro polydisperzní materiály o velikosti částic 0,1 až 100  $\mu\text{m}$ . [2] [7]



Obr. 7 – rotační bubnová sušárna [2]

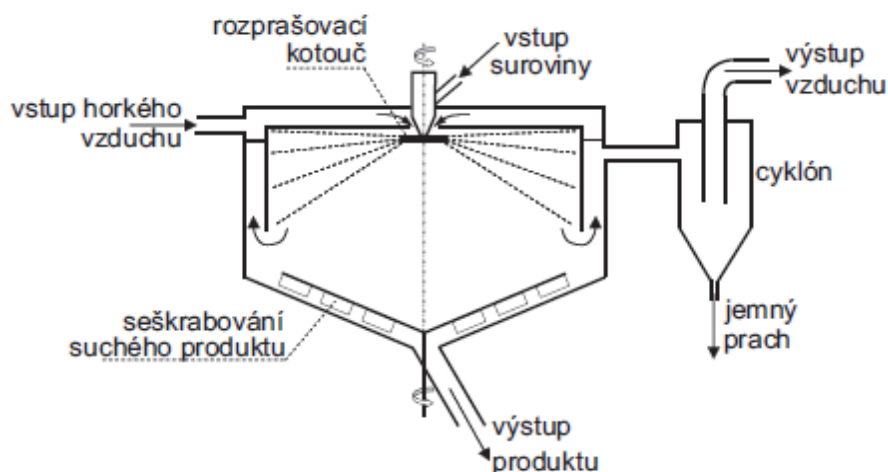


## Fluidní sušárna

Pevný produkt je profukován proudem plynu, který způsobí jeho fluidizaci, Díky tomu dochází k intenzivnímu mísení plynu a produktu, a tudíž i k intenzivnímu přenosu tepla a optimální reakční rychlosti. Existují ve více provedeních, tato provedení se liší uspořádáním fluidních vrstev. Mohou zpracovávat i pastovité látky a provádět granulaci. Jsou nejvhodnější pro monodisperzní materiály a materiály s úzkou distribucí velikosti částic. Mohou být jedno i více stupňové. Využívají se například pro sušení obilí, chemikálií nebo krystalového cukru. [2] [7]

## Rozprašovací sušárna

Hlavní částí rozprašovací sušárny je svislý válec zužující se ve spodní části (viz. obr. 8). Sušený materiál se rozprašuje pomocí rychle se otáčejícího kotouče umístěného v horní části válce. Ve válci proudí horký vzduch, který rozprášený sušený materiál vysušuje. Kapky vstříkovaného materiálu mají rychlost až  $100 \frac{m}{s}$  a jsou velmi malé. Sušení probíhá velmi rychle, zařízení je vhodné i pro látky citlivé na teplo. V rozprašovací sušárně se suší například: prací prostředky, mléko, léčiva, vejce, dětská výživa, škrob, káva, kakao. [2] [7]



Obr. 8 – rozprašovací sušárna [2]

## Proudová sušárna

Vlhký materiál je přiváděn do hlavního potrubí proudové sušárny, kde je sušen proudem sušícího média. Důležité je, aby rychlost vzduchu byla vyšší než usazovací rychlost sušeného materiálu. V odlučovači se pak odděluje vzduch od sušeného materiálu. Často se používá částečný recykl pro sušený materiál. V proudové sušárně probíhá sušení pouze po dobu několika sekund, je vhodná pro jemnozrnné materiály. Je v ní možno sušit například: škrob, kvasinky, kostní moučku, polévky. [2] [7]

## Komorová sušárna

Komorová sušárna je zařízení pracující vsádkově. Do uzavřené komory je vložen vozík s patry, na kterých je rozmístěn sušený materiál. Ventilátor vhání vzduch do sušící komory, v komoře jsou umístěny kalorifery, které mohou být realizovány například jako výměníky tepla vyhřívané parou. Část vzduchu poté opouští sušárnu a přivádí se zase vzduch nový. Sušárny jsou vhodné na sušení masa, ovoce a zeleniny. [2] [7]

## Mikrovlnná sušárna

Uplatňují se při dosušování materiálu, dále také u materiálů citlivých na teplotu nebo na mechanické poškození. Mikrovlnné sušárny jsou vhodné pro materiály s buněčnou strukturou, jako např. dřevo, a pro materiály s nízkou vlhkostí: kůže, keramika, ovoce, rýže, tabák, těstoviny. [2] [7]

## Konvektivní sušárna

Viz. kapitola 3.1 Metody sušení v potravinářském průmyslu

## 3. Sušení v potravinářském průmyslu

Sušení je v potravinářském průmyslu velmi důležitou součástí procesu zpracování potravin. Napomáhá velkou mírou k zvýšení doby trvanlivosti potravin. Jedná se o nejstarší metodu konzervování jídla. Při porovnání s ostatními metodami sušení může být provedeno velice snadno. Při nutnosti požadování zachování nutričních hodnot, vzhledu a chuti jídla nejsou tou nejlepší variantou, mnohem lepší při takovýchto požadavcích je zvolit například konzervování nebo zmražení. Ovšem velkou výhodou sušení je, že sušené výrobky nezabírají tolik místa jako potraviny například konzervované či zmražené a mají také mnohem menší hmotnost.

Potraviny mohou být bez jakékoliv větší námahy sušeny i doma bez potřeby speciálních sušících zařízení – například sluncem. Sušení sluncem je ovšem závislé na klimatu, ve kterém je provozováno, tudíž není zdaleka vhodné pro všechny oblasti zeměkoule.

Pro co nejvyšší kvalitu produktu by mělo být sušení provedeno ihned po sklizení produktu. Sušení by mělo být dostatečně rychlé, ale ne příliš prudké, aby nedošlo ke spálení či jinému poškození sušené potraviny.

Při sušení ovoce dochází ke zničení některých druhů vitamínů (především A a C), ovšem tomu je možné částečně zamezit vystavením ovoce síře, která pomáhá udržet tyto vitamíny v ovoci. [7] [8]

### 3.1 Metody sušení v potravinářském průmyslu

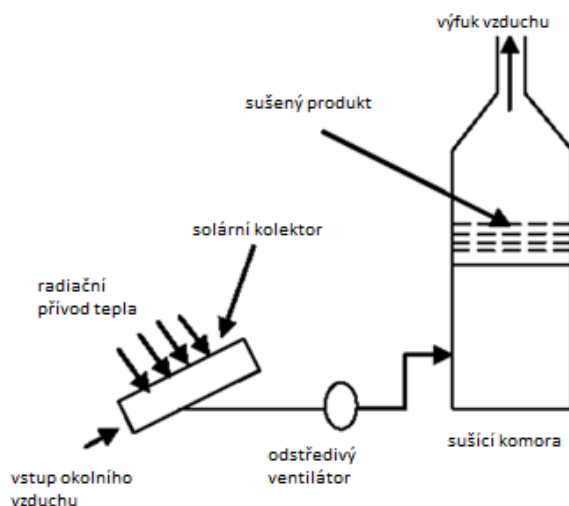
#### Sluneční sušení

##### a) Přímá metoda:

Princip využití přímé metody při slunečním sušení spočívá v rozložení sušeného materiálu na sušící podklad. Tato metoda je ovšem velmi pomalá a závislá na okolních podmínkách. Sušení přímou metodou trvá většinou v řádu dní. Dochází k znečišťování sušeného produktu prachem a dalšími škodlivinami. [8]

## b) Nepřímá metoda:

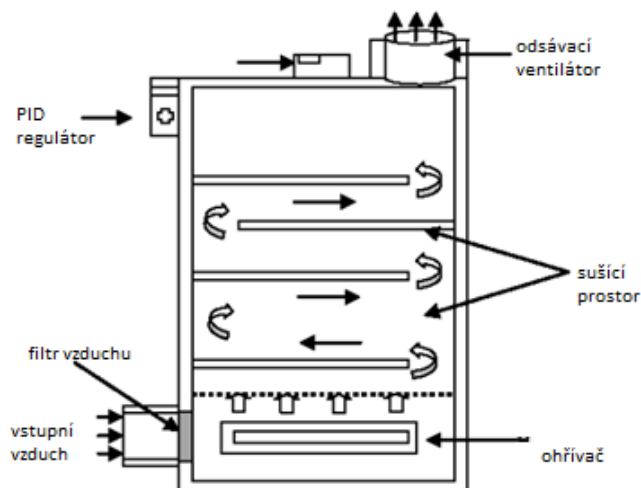
Nepřímá sluneční sušička byla vyvinuta, aby vymýtila problémy, s nimiž se setkává přímá metoda sušení. Základní druhy nepřímých slunečních sušáren jsou: komorová, komínová, vzduchem větraná. V nepřímé metodě sušení slunečním zářením se teplo získané systémem používá k ohřevu vzduchu, který protéká okolo produktu, který má být vysušen. [8]



Obr. 9 – nepřímá sluneční sušárna – [3]

## Konvektivní sušení

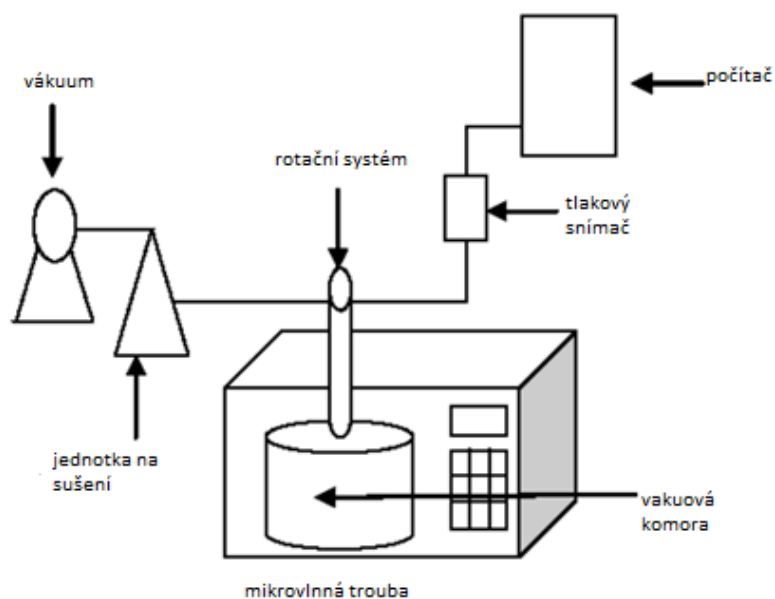
Konvektivní způsob sušení se používá k odstranění vody z potravin za pomoci horkého vzduchu. Horký vzduch může procházet výrobkem způsobem, který přenáší teplo na potraviny a odstraní se vlhkost. Na obr. 11 je znázorněno schéma konvektivní patrové sušárny. Sušená potravina je položena na patra, kolem kterých proudí vzduch. Z počátku je to suchý vzduch přiváděný ve spodní části sušárny, přiváděný vzduch prochází filtrem, aby neznečistoval sušené potraviny, dále je pak odváděn horní částí, odvádí s sebou vlhkost z potravin v podobě miniaturních kapiček. [8]



Obr. 10 – konvektivní sušárna [3]

### Radiační sušení (mikrovlnné)

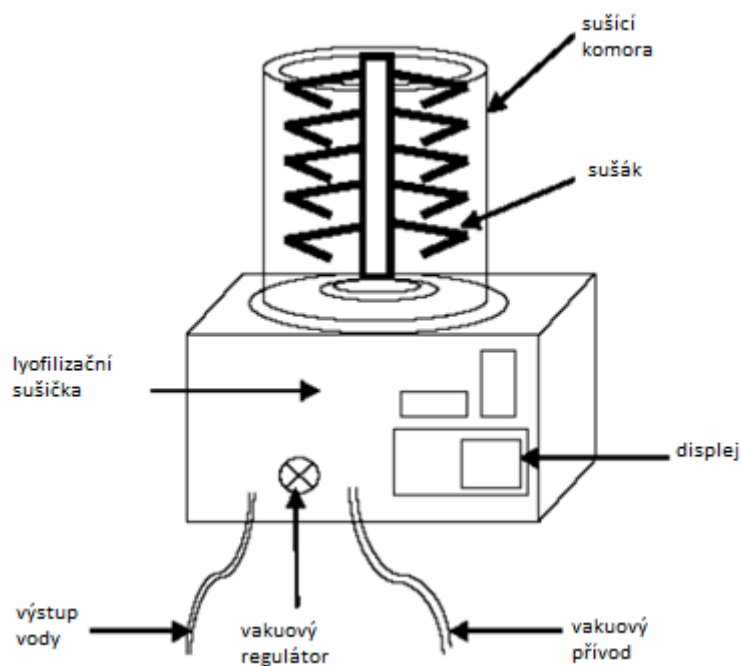
Mikrovlnné záření je elektromagnetické záření, které pracuje mezi frekvenčním pásmem 300 MHz až 300 GHz a má vlnovou délku od 1 mm do 1 m. Šíření mikrovln probíhá pomocí elektrického a magnetického pole. Mikrovlnné sušení vyžaduje oproti ostatním metodám menší čas na sušení a pracuje při nižších teplotách. Problémem mikrovlnného sušení je, že může nastat spálení materiálu, protože na konci procesu sušení je již těžko dostupná voda obsažená v materiálu. Hlavní výhodou použití mikrovlnné trouby (obr. 11) je její schopnost kombinovat s jiným způsobem sušení, jako například sušení ve vakuu. [8]



Obr. 11 – mikrovlnné + vakuové sušení [3]

## Sušení mrazem – lyofilizace

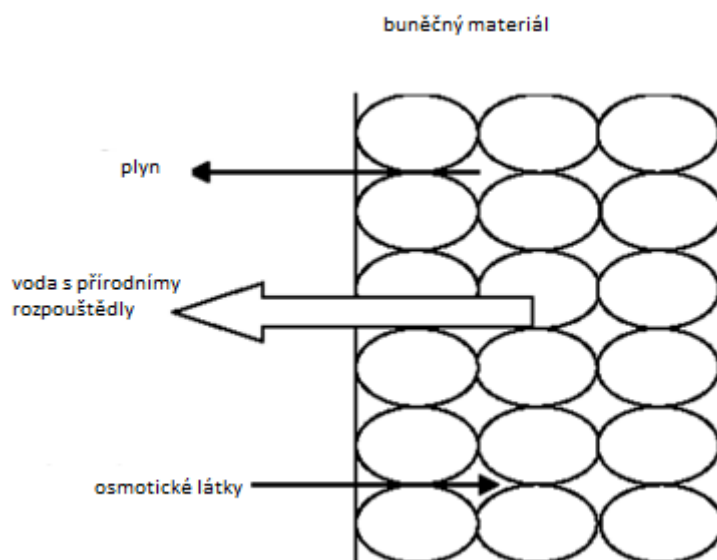
Při lyofilizaci dochází k přímé přeměně tuhého na plynné skupenství. Produkt je zmrazen a okolní tlak v sušičce (obr. 12) je snížen (snažíme se dosáhnout vakua), za nízkého tlaku se z produktu rychle odpařuje voda a dochází k vysoušení. Produkt musí být dobře zmrazen, aby nedošlo k tomu, že se částice, které nejsou dostatečně promzrlé, začnou vařit. Plocha, na kterou je produkt rozložen, by měla být co největší a vrstva co nejušší. [8]



Obr. 12 – Lyofilizační sušárna schéma [3]

## Osmotické sušení (osmotické dehydratace potravin)

Při osmotickém sušení jsou potraviny, které mají být vysušeny, umístěny v hypertonickém roztoku, který způsobuje rozdíl v koncentraci a také způsobuje, že obsah vody v potravinách je vyveden ze vzorku do roztoku. Rovněž také dochází k difuzi roztoku do sušené potraviny. Přenos hmoty během osmózy (obr. 13) může být zodpovědný za změnu fyzikálních, chemických a nutričních hodnot, chuti a strukturálních vlastností konečného produktu. Monosacharidy, disacharidy a soli, jako je chlorid sodný, jsou nejčastěji používané osmoticky aktivní látky. Možnost provádění procesu při pokojové teplotě je výhodnější v porovnání s jinými běžnými způsoby sušení, jako je horký vzduch nebo vakuový způsob sušení, jelikož energie potřebná pro provádění postupu je podstatně nižší. [8]



Obr. 13 – osmotické sušení [3]

## Shrnutí

Předchozí dvě kapitoly uvádí základní přehled sušáren, jak všeobecně používaných, tak zaměřených na potravinářský průmysl. Pro experiment prováděný v rámci diplomové práce byla vybrána konvektivní vsádková sušárna, vzhledem k její přítomnosti v laboratořích ČVUT, ústavu procesní a zpracovatelské techniky.

## 4. Nestacionární konvektivní přenos hmoty z kostky cukru do sušícího vzduchu

Kapitola řeší základní rovnice přenosu hmoty aplikované na případ řešení sušení kostky cukru proudem vzduchu.

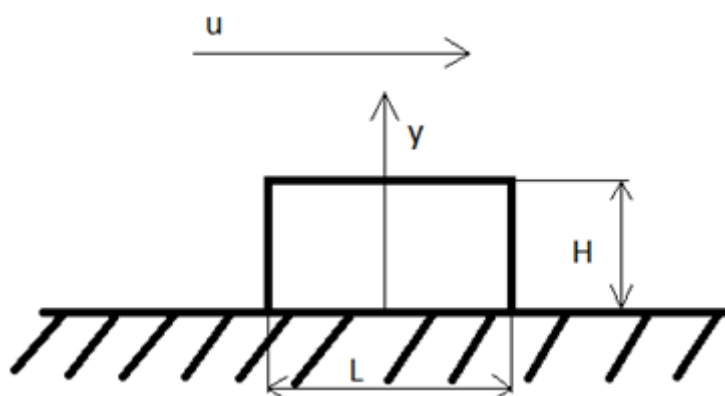
### 4.1 Řešení rovnice přenosu hmoty

Důležitými parametry sušení jsou difuzní koeficient a součinitel přestupu hmoty. Tyto hodnoty je možné získat z experimentu, analytického výpočtu nebo CFD simulace. Matematická formulace přenosu hmoty v porézních pevných látkách během sušení je obvykle založena na difúzní rovnici. Efektivní difuzivita je celkový koeficient, který popisuje průtok vlhkosti kapalinou, párou a kombinovaným přenosem kapaliny / par v porézních materiálech. [4]

Druhý Fickův zákon představuje jednorozměrný tok vlhkosti k povrchu kostky se současným konvektivním odvodem vlhkosti z povrchu kostky do okolního vzduchu (obr. 14):

$$\frac{\partial W_A}{\partial \tau} = \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^n D_{ef} \frac{\partial W_A}{\partial r} \right] \quad (21)$$

Rovnice (21) je napsána v obecném tvaru, nezávisle na vyšetřované geometrii. Parametr  $n$  rozlišuje předpis rovnice pro geometrii. Deska  $n = 0$ , válec  $n = 1$  nebo koule  $n = 2$ .



Obr. 14 – zobrazení směrů a rozměrů pro výpočet



Kde  $W_A$  je relativní vlhkost materiálu,  $D_{ef}$  efektivní difuzivita ( $\frac{m^2}{s}$ ),  $\tau$  čas (s). Pro desku (za kterou je kostka cukru považována) je mocnitél  $n = 0$  a směr osy souřadného systému  $r = y$ .

A  $y$  je souřadnice osy v Kartézském souřadném systému.

Pak lze tedy napsat:

$$\frac{\partial W_A}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_{ef} \frac{\partial W_A}{\partial y} \right] \quad (22)$$

Předpokládá se, že počáteční vlhkost je známá  $W_{A_0}$  pro  $\tau = 0$

Vzhledem k tomu, že rovnice (22) je arciální diferenciální rovnice druhého řádu, musí být nejprve nalezeny dvě okrajové podmínky.

Dvě okrajové podmínky pro  $y = H$  za předpokladu 2. fáze sušení, kdy se na povrchu kostky ustaví rovnovážná vlhkost  $W_{eq}$ , kde  $k_y$  je součinitel přenosu hmoty a  $Y^*$  a  $Y$  jsou vlhkosti okolí.

$$W_A = W_{eq}$$

$$-D_{ef} \rho_m \frac{\partial W_A}{\partial y} = k_y [Y^* - Y] \quad (23)$$

A druhá okrajová podmínka pro  $y = 0$  kde je předpokládáno, že kostka leží na desce přes kterou vlhkost neprochází:

$$\frac{\partial W_A}{\partial y} = 0$$

Cílem je odvodit rovnici, která bude použita pro stanovení  $D_{ef}$ . Pro jednodušší zacházení s rovnicí je převedena do bezrozměrného stavu pomocí následujících kritérií:

$$W_A^* = \frac{W_A - W_{eq}}{W_0 - W_{eq}}, \quad W_A = W_A^* (W_0 - W_{eq}) + W_{eq} \quad (24)$$

$$F_0 = \frac{D_{ef0} \tau}{H^2} = \tau^*, \quad \tau = \tau^* H^2 \frac{1}{D_{ef}}$$

$$y^* = \frac{y}{H}, \quad y = y^* H$$

Nahrazení bezrozměrnými koeficienty:

$$\frac{\partial W_A^*(W_0 - W_{eq}) + W_{eq}}{\partial \tau^* H^2 \frac{1}{D_{ef}}} = \frac{\partial}{\partial y^* H} [D_{ef} \frac{\partial W_A^*(W_0 - W_{eq}) + W_{eq}}{\partial y^* H}] \quad (25)$$

Po úpravách tedy dostaneme finální rovnici v bezrozměrném tvaru:

$$\frac{\partial W_A^*}{\partial \tau^*} = \frac{\partial}{\partial y^*} \left[ \frac{D_{ef}}{D_{ef0}} \frac{\partial W_A^*}{\partial y^*} \right] \quad (26)$$

## 4.2 Zjednodušené analytické řešení

Následující analytické řešení je převzato z [4] a [13], kde je počátek souřesného systému umístěn ve středu výšky kostky.

Pro nekonečnou desku jsou počáteční podmínky následující [13]:

$$D_{ef} \frac{\partial W_A(y, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=\mp \frac{H}{2}} = \beta (W_A(y, \tau) \Big|_{y=\mp \frac{H}{2}} - W_{eq}) \quad (27)$$

Kde  $\beta$  je součinitel přestupu hmoty  $\left(\frac{m}{s}\right)$ ,  $W_A(y, \tau)$  je vlhkost na pozici  $y$  v čase  $\tau$ .  $W_{eq}$  je rovnovážná vlhkost a  $H$  je výška kostky ve směru osy  $y$ .

Pro nekonečnou desku s počátečním obsahem vlhkosti  $W_0$  a počátečními podmínkami uvedenými v předchozí rovnici, je analytické řešení pro  $W_A(y, \tau)$  z (21):

$$W_A(y, \tau) = W_{eq} + (W_0 - W_{eq}) \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\mu_n \frac{y}{H}\right) \exp\left(-\frac{\mu_n^2}{\left(\frac{H}{2}\right)^2} D_{ef} \tau\right) \quad (28)$$

Kde člen  $A_n$  je definován následovně:

$$A_n = \frac{4 \sin \mu_n}{2 \mu_n + \sin(2 \mu_n)} \quad (29)$$

A  $\mu_n$  jsou kořeny charakteristické rovnice pro nekonečnou desku:

$$\cot(\mu_n) = \frac{\mu_n}{Bi_m} \quad (30)$$

Kde  $B_i$  je Biotovo číslo pro přestup hmoty definováno následovně:

$$Bi_m = \frac{\beta \frac{H}{2}}{D_{ef}} \quad (31)$$

Rovnice pro výpočet průměrné vlhkosti  $\bar{W}(\tau)$  v čase  $t$  lze spočítat takto:

$$\bar{W}_A(\tau) = W_{eq} + (W_0 - W_{eq}) \sum_{n=1}^{\infty} B_n \exp\left(-\frac{\mu_n^2}{\left(\frac{H}{2}\right)^2} D_{ef} t\right) \quad (32)$$

Kde  $B_n$  je:

$$B_n = \frac{2Bi_m^2}{2\mu_n^2(Bi_m^2 + Bi_m + \mu_n^2)} \quad (33)$$

Tento model lze následně použít k regresní analýze pro experimentální data ke zjištění efektivního difuzního koeficientu  $D_{ef}$ .

Dle [4], kde tato metoda byla použita na sušení kostek cukru, jsou výsledné difuzní koeficienty takovéto:

Teplota (°C)	rychlost vzduchu (m/s)	$D_{ef} \times 10^{-9}$ (m <sup>2</sup> /s)
45	0.56	4.23
60	0.56	4.94
80	0.56	5.34
95	0.56	5.81
80	0.43	4.69
80	0.7	5.73

Tab. 1 – hodnoty difuzních koeficientů podle [4]

### 4.3 Numerické řešení

Uvedená rovnice (26) je parciální diferenciální rovnice druhého řádu parabolického typu. Program Matlab poskytuje nástroj s názvem *pdepe*, k jejímu numerickému řešení. Tento nástroj byl použit. Skript z programu Matlab je přiložen v příloze č. 2 diplomové práce. [16]

Zavedeme-li předpoklad, že se  $D_{ef}$  nemění, bude  $D_{ef}$  odpovídat  $D_{ef0}$  čímž se z rovnice vyřadí. Tudíž v následující části je místo bezrozměrného času volen čas rozměroví, čímž se zamezí vyřazení  $D_{ef}$  z rovnice. [16]

$$\frac{\partial W_A^*(W_0 - W_{eq}) + W_{eq}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y^* H} [D_{ef} \frac{\partial W_A^*(W_0 - W_{eq}) + W_{eq}}{\partial y^* H}] \quad (34)$$

Potom:

$$\frac{\partial W_A^*}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y^*} [\frac{D_{ef}}{H^2} \frac{\partial W_A^*}{\partial y^*}] \quad (35)$$

Tato rovnice je řešena programem Matlab, konkrétně řešitelem *pdepe*, pro kterou je nutné určit okrajové podmínky v následujících tvarech:

Nejprve pro  $y = 0$ :

$$\frac{\partial W_A}{\partial y} \rightarrow y^* H = 0 \rightarrow y^* = 0 \quad (36)$$

$$\frac{\partial W_A^*(W_0 - W_{eq}) + W_{eq}}{\partial y^* H} = 0 \rightarrow \frac{\partial}{\partial y^*} [W_A^*(W_0 - W_{eq}) + W_{eq}] = 0 \quad (37)$$

Po další úpravě:

$$\frac{\partial}{\partial y^*} W_A^*(W_0 - W_{eq}) + \frac{\partial}{\partial y^*} W_{eq} = 0 \rightarrow \frac{\partial}{\partial y^*} W_A^*(W_0 - W_{eq}) = 0 \rightarrow \frac{\partial W_A^*}{\partial y^*} = 0 \quad (38)$$

Následuje druhá okrajová podmínka, tato podmínka musela být upravena oproti uvedenému tvaru (23) neboť parametry sušícího vzduchu nebyly měřeny. Sušárna není vybavena inline senzorem vlhkosti. Nicméně v rámci měření sušící křivky, byl zaznamenáván úbytek hmotnosti kostek cukru v čase, který představuje tok vodní páry z kostky do vzduchu přes plochu kostky  $S$ :

$$-D_{ef} \rho_m \frac{\partial W_A}{\partial y} = \frac{\dot{m}}{S} \quad (39)$$

Která pro *pdepe* řešitel musí být v následujícím tvaru:

$$\frac{\dot{m}}{S D_{ef} \rho_m} + \frac{\partial W_A}{\partial y} = 0 \quad (40)$$

Takto upravené rovnice slouží jako základ algoritmu, který bude vytvořen za účelem stanovení efektivního difuzního součinitele vody do sušícího vzduchu pro kostky cukru.

## 5. Analogie mezi přenosem tepla a hmoty

Analogie mezi přenosem tepla a hmoty, tedy Chilton-Colbournova analogie, spojuje mezi sebou přenos tepla a hmoty, tedy jinak řečeno pokud změříme přenos hmoty, můžeme spočítat přenos tepla a naopak. Tato analogie bude využita při výpočtu součinitelů přestupu hmoty za pomoci součinitelů přestupu tepla, které budou zjištěny z korelace a pomocí programu Ansys FLUENT. [10] [11]

Stanovení některých bezrozměrných veličin:

$$\text{Prandtl, Pr} \quad \frac{c_p \mu}{\lambda}$$

$$\text{Schmidt, Sc} \quad \frac{\nu}{D_{efW}}$$

$$\text{Reynolds, Re} \quad \frac{\nu l}{\nu}$$

$$\text{Stanton, St} \quad \frac{\alpha}{c_p \rho \nu}$$

$$\text{Nusselt, Nu} \quad \frac{\alpha L}{\lambda}$$

$$\text{Sherwood, Sh} \quad \frac{\beta l}{D_{ef}}$$

Dále je možno začít s rovnicí pro přestup tepla, Chilton-Colbournova analogie v rovnici pro přenos tepla vychází z následující korelace:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_1} \right)^{0.14} \quad (41)$$

Kterou lze přepsat do následujícího tvaru:

$$\frac{Nu}{RePr} = 0.023 \frac{(Re)^{0.8} (Pr)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_1}\right)^{0.14}}{RePr} \quad (42)$$

Což lze dále upravit na rovnici:

$$St Pr^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_1}\right)^{-0.14} = 0.023 Re^{-0.2} \quad (43)$$

Pro turbulentní proudění existuje empirická rovnice spojující faktor tření  $f$  a Reynoldsovo číslo:

$$\frac{f}{2} = 0.023 Re^{-0.2} \quad (44)$$

Spojením těchto dvou posledních rovnic tedy dosáhneme výsledné rovnice pro přenos tepla:

$$\frac{f}{2} = St Pr^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_1}\right)^{0.14} = 0.023 Re^{-0.2} \quad (45)$$

Tato rovnice je často nazývána  $J_H$  faktorem.

Rovnice pro přenos hmoty:

$$\frac{\beta D}{D_{AB}} = 0.023 (Re)^{0.83} (Sc)^{0.33} \left(\frac{\mu}{\mu_1}\right)^{0.14} \quad (46)$$

Tuto rovnici lze přepsat do následujícího tvaru:

$$\frac{\beta}{\bar{v}} \left(Sc^{\frac{2}{3}}\right) (Re)^{0.03} = 0.023 Re^{-0.2} \quad (47)$$

Člen  $(Re)^{0.03}$  lze zanedbat, a tedy je možné rovnici přepsat do následujícího tvaru:

$$\frac{\beta}{\bar{v}} \left(Sc^{\frac{2}{3}}\right) = 0.023 Re^{-0.2} \quad (48)$$

Empirická rovnice spojující Reynoldsovo číslo a faktor tření se dá použít i zde, tudíž můžeme napsat:

$$\frac{f}{2} = \frac{\beta}{\bar{v}} \left(Sc^{\frac{2}{3}}\right) = 0.023 Re^{-0.2} \quad (49)$$

Tento vztah bývá označován jako  $J_D$  factor.

S následným využitím Reynoldsovy analogie

$$\frac{f}{2} = \frac{\alpha}{c_p \rho v} = St = \frac{\beta}{v} \quad (50)$$

Ize provést další úpravy předchozích vztahů – porovnání  $J_D$  a  $J_H$  faktorů:

$$\frac{f}{2} = \frac{\alpha}{c_p \rho v} Pr^{\frac{2}{3}} \left( \frac{\mu}{\mu_1} \right)^{0.14} = \frac{\beta}{v} (Sc)^{\frac{2}{3}} \quad (51)$$

Poměr viskozit (průměrná viskozita ku viskozitě u stěny) je možné položit roven jedné. Pak lze tedy stanovit výsledný vztah této analogie:

$$\frac{f}{2} = \frac{\alpha}{c_p \rho v} Pr^{\frac{2}{3}} = \frac{\beta}{v} (Sc)^{\frac{2}{3}} \quad (52)$$

Tato rovnice je použitelná v rozsahu pro přenos tepla:

$$10\,000 < Re < 300\,000$$

$$0,6 < Pr < 100$$

A pro přenos hmoty:

$$2000 < Re < 300\,000$$

$$0,6 < Sc < 2\,500$$

## 6. Shrnutí teoretické části a následný postup

### 6.1 Shrnutí teoretické části

Diplomová práce se zabývá zjištěním difuzního součinitele a součinitele přestupu hmoty při konvektivním sušení kostek cukru, dále pak návrhem pásové sušárny. Pro dosažení cílů diplomové práce bylo nejprve nutné vypracovat rešerši, dle které se poté odvíjel následný postup.

V předchozí části diplomové práce byla vypracována rešerše, která se zabývala nejprve základními pojmy sušení, byl ukázán příklad kinetiky konvektivního sušení v periodické konvektivní sušárně. Z čehož lze říci, že pro řešení zadání diplomové práce bude tedy nutné naměřit sušící křivku pro daný materiál obtékaný vzduchem. V druhé a třetí kapitole diplomové práce byl uveden základní přehled sušáren, jak všeobecně používaných, tak zaměřených na potravinářský průmysl. Pro experiment prováděný v rámci diplomové práce byla vybrána konvektivní vsádková sušárna, vzhledem k její přítomnosti v laboratořích ČVUT, ústavu procesní a zpracovatelské techniky.

V další části byla provedena rešerše na téma: Nestacionární konvektivní přenos hmoty z kostky cukru do sušícího vzduchu. Kapitola řeší základní rovnice přenosu hmoty aplikované pro případ řešení sušení kostky cukru proudem vzduchu. Nejprve je z druhého Fickova zákona odvozena rovnice, kterou lze aplikovat pro sušení kostek cukru. Tato rovnice je následně řešena nejprve analyticky (řešení převzato z [4]) a poté numericky. Numerické řešení je vypracováno podle [16].

Poslední část rešerše se zabývá Chilton-Colbournovou analogií mezi řenosem tepla a hmoty, tato analogie bude dále využita při zjišťování součinitele přestupu hmoty.

### 6.2 Následný postup

Následující část diplomové práce se zabývá praktickým řešením. Z rešerše vyplývá, že bude nutné provést experiment sušení kostek cukru v halové laboratoři ČVUT. Experiment bude proveden z důvodu nutnosti zjištění difuzního koeficientu z cukru do vody ze sušící



křivky. Difuzní koeficient dále bude nutný k zjištění součinitele přestupu hmoty. K jeho zjištění jsou použity metody vypracované v předchozí, rešeršní části. Budou provedena tři měření a zpracování do průměrných hodnot.

Pomocí programu Ansys FLUENT bude dále vytvořen model, který odpovídal rozměrům sušící komory a rozmístění kostek v sušící komoře stejně tak, jako tomu bylo při experimentu v laboratořích. V programu Autodesk Inventor bude vymodelován model sušící komory s kostkami cukru, tento model bude dále vložen do programu Fluent, kde budou jednotlivé plochy popsány a rozděleny rovinami. Výstupem z tohoto programu budou součinitele přestupu tepla na jednotlivých stěnách kostek.

Součinitele přestupu tepla z programu Ansys FLUENT budou následně porovnány se součinitelem přestupu tepla vypočteným pomocí korelačního vztahu. Tím by měl být model sušení kostek cukru validován pro následné vyšetřování vlivu distribuce kostek v sušící komoře na rychlost sušení.

Dále bude pomocí programu Ansys FLUENT měněna vzdálenost mezi kostkami a bude změněna i šířka sušícího tunelu kvůli tomu, že při zvětšení mezer mezi kostkami není stávající tunel dostatečně široký. Cílem je zjistit vliv změny vzájemné vzdálenosti kostek cukru na součinitel přestupu hmoty.

Z výsledných hodnot součinitelů přestupu tepla z programu Ansys FLUENT a za pomoci difuzního koeficientu zjištěného z experimentu pomocí analytické a numerické metody bude možné součinitele přestupu tepla převést na součinitele přestupu hmoty. Tyto součinitele budou porovnány s daty z literatury, a zároveň bude vyhodnocen vliv rozmístění kostek.

## 7. Metodika řešení v programu ANSYS

Další části diplomové práce se již zabývají řešením konkrétního problému, tedy sušení kostek cukru a jejich nevhodnější distribucí v sušárně.

Pro zjištění součinitele přestupu tepla na stěnách kostek cukru bylo nutné nasimulovat případ v programu Ansys FLUENT. Byla tedy vytvořena geometrie – komora konvektivní sušárny s umístěnými vzorky uvnitř. Problém bylo nutné řešit ve 3D, bylo simulováno rychlostní pole proudění při rychlosti  $2 \frac{m}{s}$ . Model představuje kompletní geometrii a je nutné ji správně nastavit, resp. popsat jím co nejpřesněji reálnou situaci.

Z pohledu sušící komory jako celkové geometrie se jedná vzhledem k rychlosti proudění vzduchu o turbulentní proudění (viz. vypočtené Reynoldsovo číslo). Proto pro řešení rychlostního pole byl použit model turbulence *RANS*,  $k - \omega SST$ . Z hlediska obtékání kostky cukru vzduchem se však jedná o laminární režim toku, kdy je předpokládáno, že stěny komory neovlivňují rychlostní pole v blízkosti kostky. Jinými slovy jsou dostatečně vzdálené od stěny cukru. Proto při vyhodnocení součinitele přestupu tepla na stěně kostky cukru je použita korelační rovnice pro laminární režim proudění obtékané desky.

### 7.1 Geometrie a fyzikální vlastnosti látek

Geometrie, se kterou bylo počítáno v programu ANSYS, byla zvolena na základě geometrie laboratorní sušárny v laboratořích ČVUT. 3D model byl vytvořen ve studentské verzi programu Autodesk Inventor a poté přenesen do programu ANSYS, kde byl dále modifikován (viz. obr 15 a 16).

Fyzikální vlastnosti cukru, které byly použity pro výpočet, jsou následující [12]:

$$\rho = 1030 \frac{kg}{m^3}$$

$$c_p = 712 \frac{J}{kgK}$$

$$\lambda = 0,139 \frac{W}{mK}$$

Hmotnost jedné kostky cukru odpovídá přibližně:  $m = 6 \pm 0,2 \text{ g}$ .

Fyzikální vlastnosti vzduchu (pro  $80^\circ\text{C}$ ), které byly použity pro výpočet, jsou následující [12] [13]:

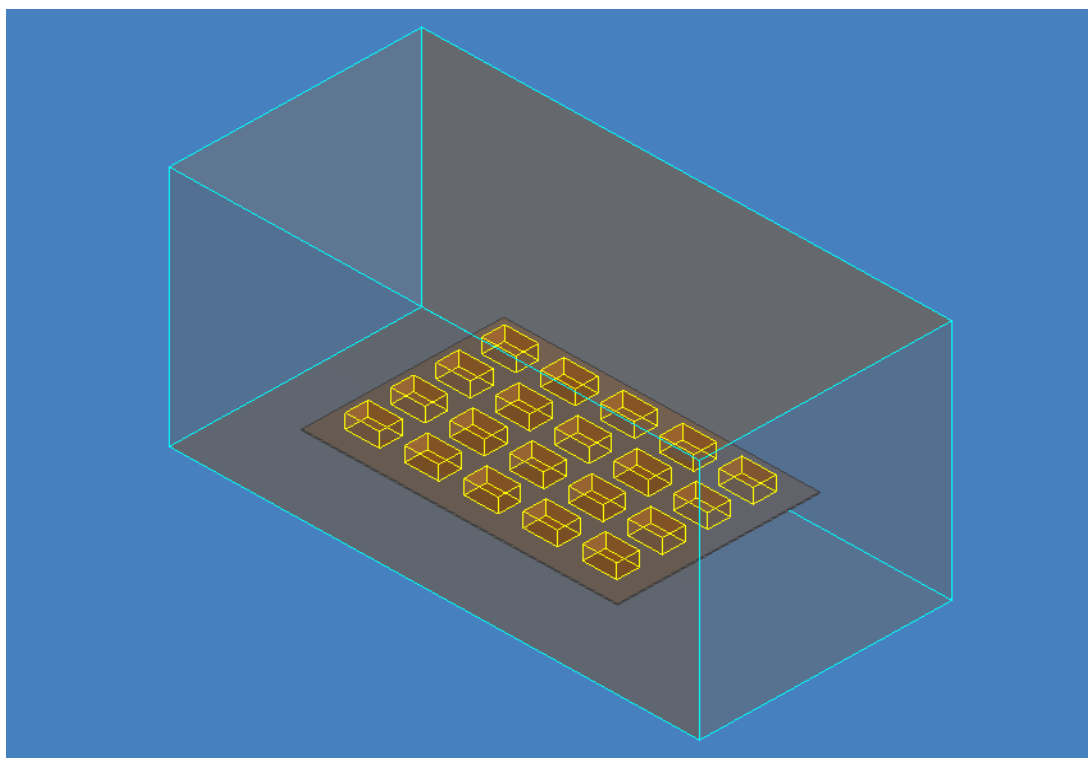
$$\rho = 0,986 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$c_p = 1020 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$$

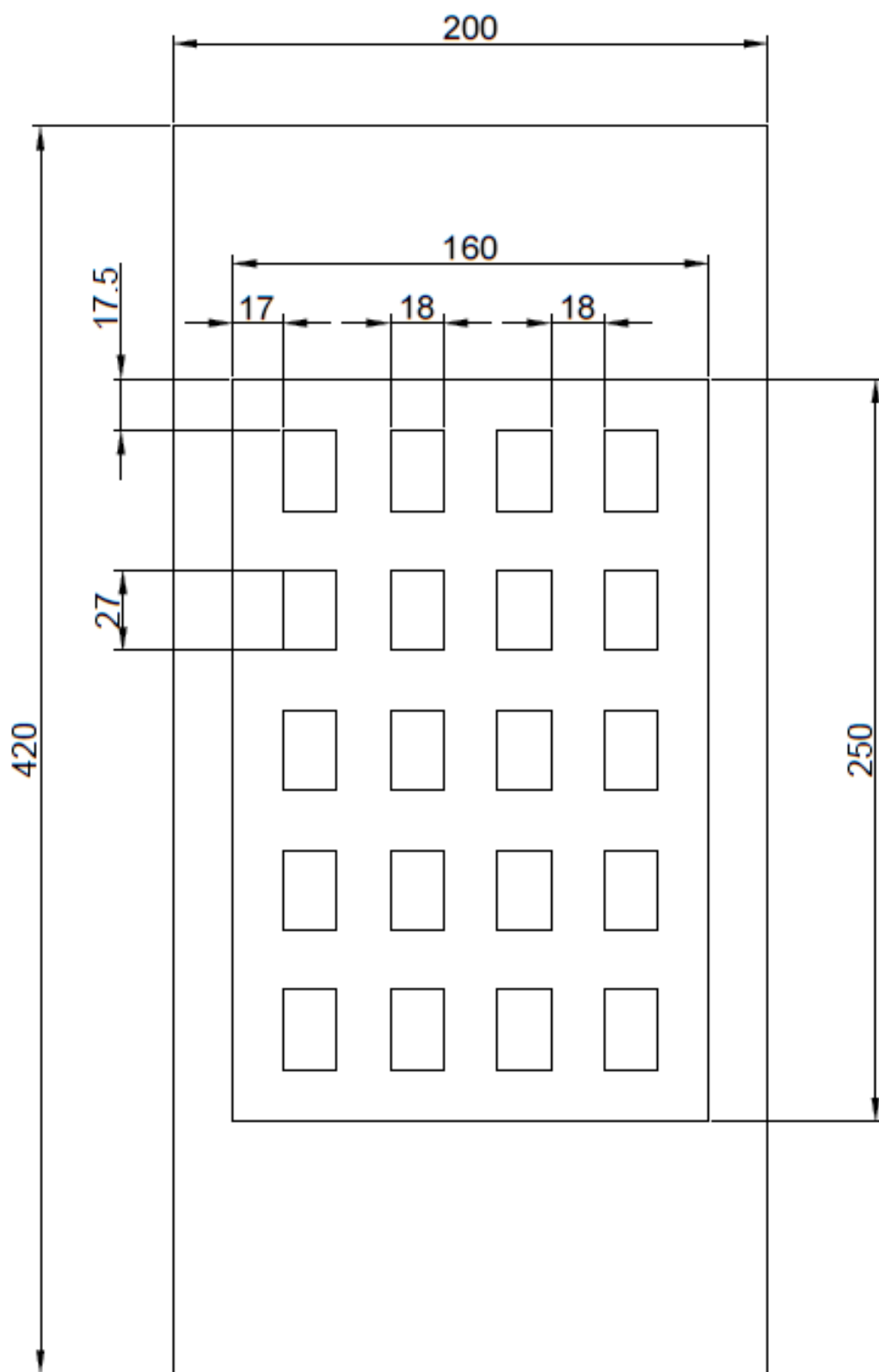
$$\lambda = 0,0293 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$\mu = 2,1 \cdot 10^{-5} \text{ Pas}$$

$$\nu = 2,12 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$



Obr. 15 – Geometrie v programu Autodesk Inventor



Obr. 16 – Kótované schéma geometrie

## 7.2 Postup v programu ANSYS

Model byl řešen metodou konečných prvků, v programu Ansys byla geometrie rozdělena rovinami na menší díly, pro větší přehlednost a označování ploch a objemů. Poté byl celý model vysítován, jedním z cílů síťování bylo, aby výsledná síť obsahovala pouze čtvercové elementy, což se podařilo. Počet elemtů sítě byl 2 183 014. Simulace byla prováděna pro rychlost  $2 \frac{m}{s}$ . Výsledné součinitele přestupu tepla ze simulace byly dále porovnány s výpočtem pomocí korelace.

Výpočet Reynoldsova čísla v kanále použitém v programu ANSYS:

$$D_h = \frac{4S}{O} = \frac{4 \cdot 200 \cdot 200}{4 \cdot 200} = 200 \text{ mm} \quad (53)$$

$$Re_{80} = \frac{vD_h}{\nu} = \frac{2 \cdot 200 \cdot 10^{-3}}{2,12 \cdot 10^{-5}} = 18\,868 \quad (54)$$

Výpočet Prandtlova čísla pro následující analytické řešení:

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda} = \frac{1020 \cdot 2,1 \cdot 10^{-5}}{0,0293} = 0,728 \quad (55)$$

Kde:

$O$  – omočený obvod

$S$  – Průtočná plocha

$D_h$  - Hydraulický průměr

$\nu$  – kinematická viskozita vzduchu

$v$  – střední rychlost v profilu

Dle velikosti Reynoldsova čísla lze říci, že druh proudění vzduchu v kanále je turbulentní. Tento závěr byl také nastaven v programu ANSYS.

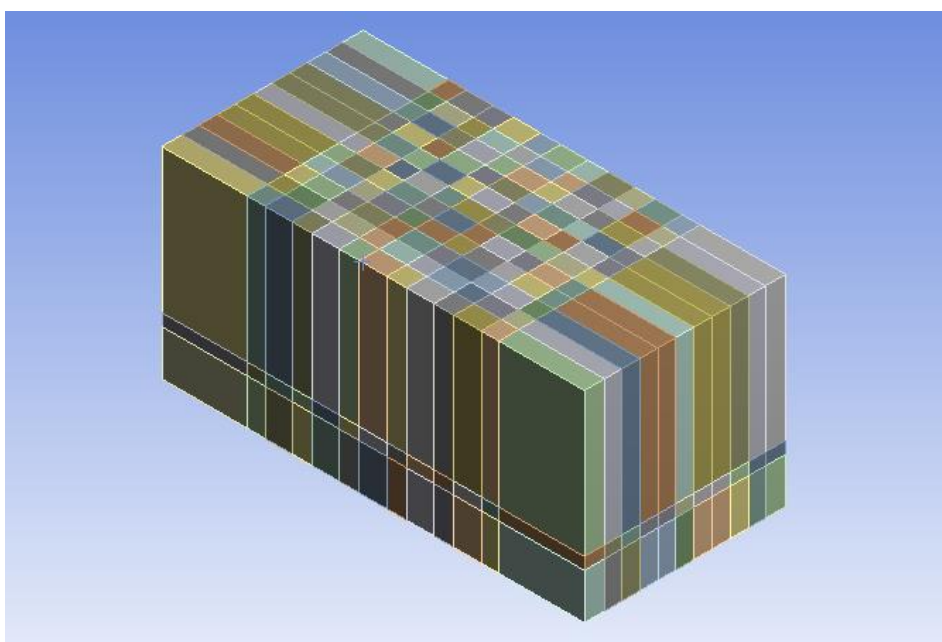
Všechny jednotlivé objemy modelu získané rozdělením modelu rovinami byly pojmenovány a náležitě označeny. Byla určena počáteční podmínka výpočtu – na vstupu do kanálu byla teplota vzduchu nastavena na  $80^\circ\text{C}$ . Teplota kostek cukru byla nastavena na  $20^\circ\text{C}$ .

Ovšem pro simulaci byla zvolena tepelná vodivost cukru:

$$\lambda = 1 \cdot 10^{-24} \frac{W}{mK}$$

Proces sušení kostky cukru je nestacionární. Stejně tak přestup tepla v modelu sušárny. Součinitel přestupu hmoty se s časem mění. Za předpokladu druhé fáze sušení je hmotnostní tok z kostky konstantní, a stejně tak součinitel přestupu hmoty. Toho lze využít při simulaci přenosu tepla, kdy se eliminuje ohřev kostky cukru nastavením vysokého resp. nekonečného tepelného odporu na straně cukru. Tím se výpočet výrazně zjednoduší a sníží se náročnost výpočtu i postprocesingu, neboť je úloha považována jako stacionární.

Na obr. 17 je zobrazena geometrie kanálu, která byla rozdělena rovinami tak, aby bylo možné zjistit součinitel přestupu tepla na každé z ploch kostek cukru.

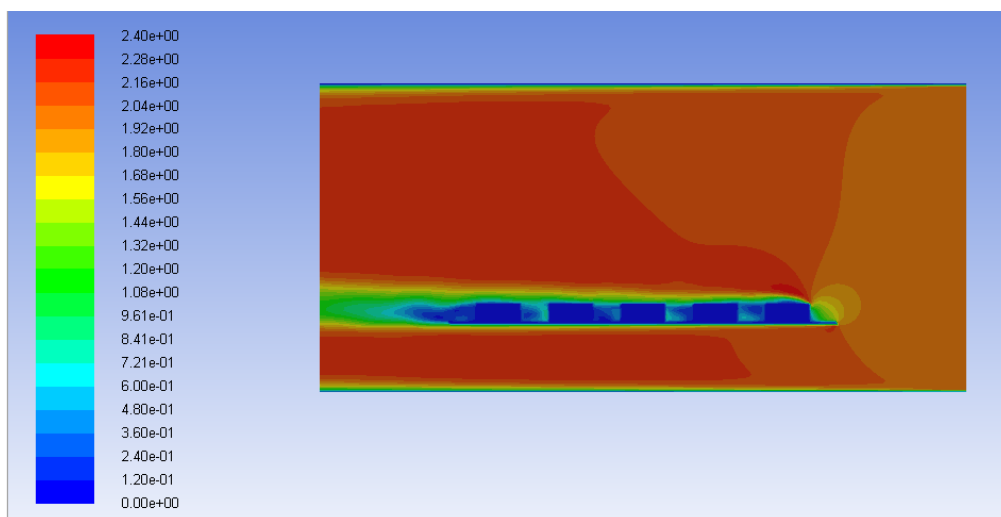


Obr. 17 – Geometrie v programu ANSYS rozdělená plochami

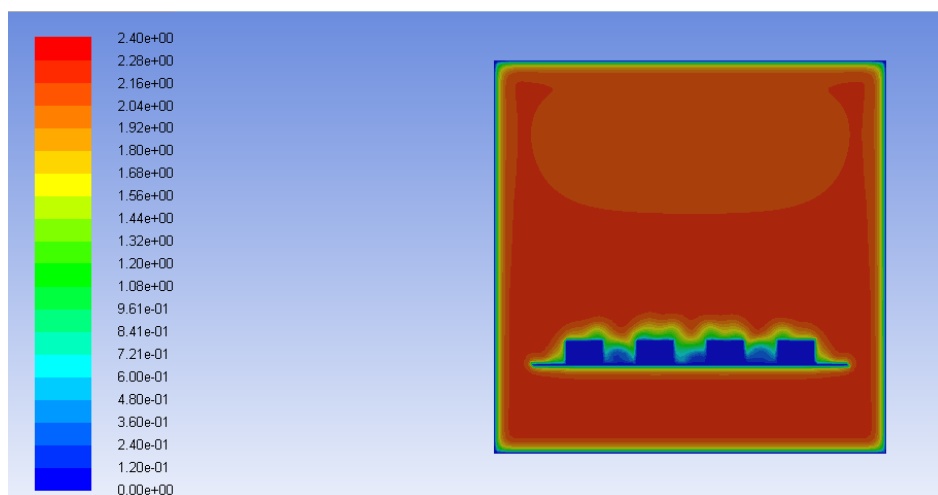
### 7.3 Výsledky výpočtu pro 2 m/s

Výsledkem výpočtu jsou součinitele přestupu tepla na stěnách kostek cukru obr. 20, kde je zřejmé, že součinitel přestupu tepla se téměř nemění v závislosti na tom, na jaké kostce je měřen, součinitele přestupu tepla na čelních a zadních stěnách si odpovídají, stejně tak jako součinitele na vrchu kostky a bočních stěnách. Jednotlivé hodnoty součinitelů přestupu tepla jsou také zobrazeny v tab. 2. a v tab. 3 jsou poté zobrazeny průměrné hodnoty z tab. 2, kde AVG označuje průměrnou hodnotu.

Průměrný součinitel přestupu tepla všech kostek na vrchní stěně bude dále porovnán s analytickým výpočtem.



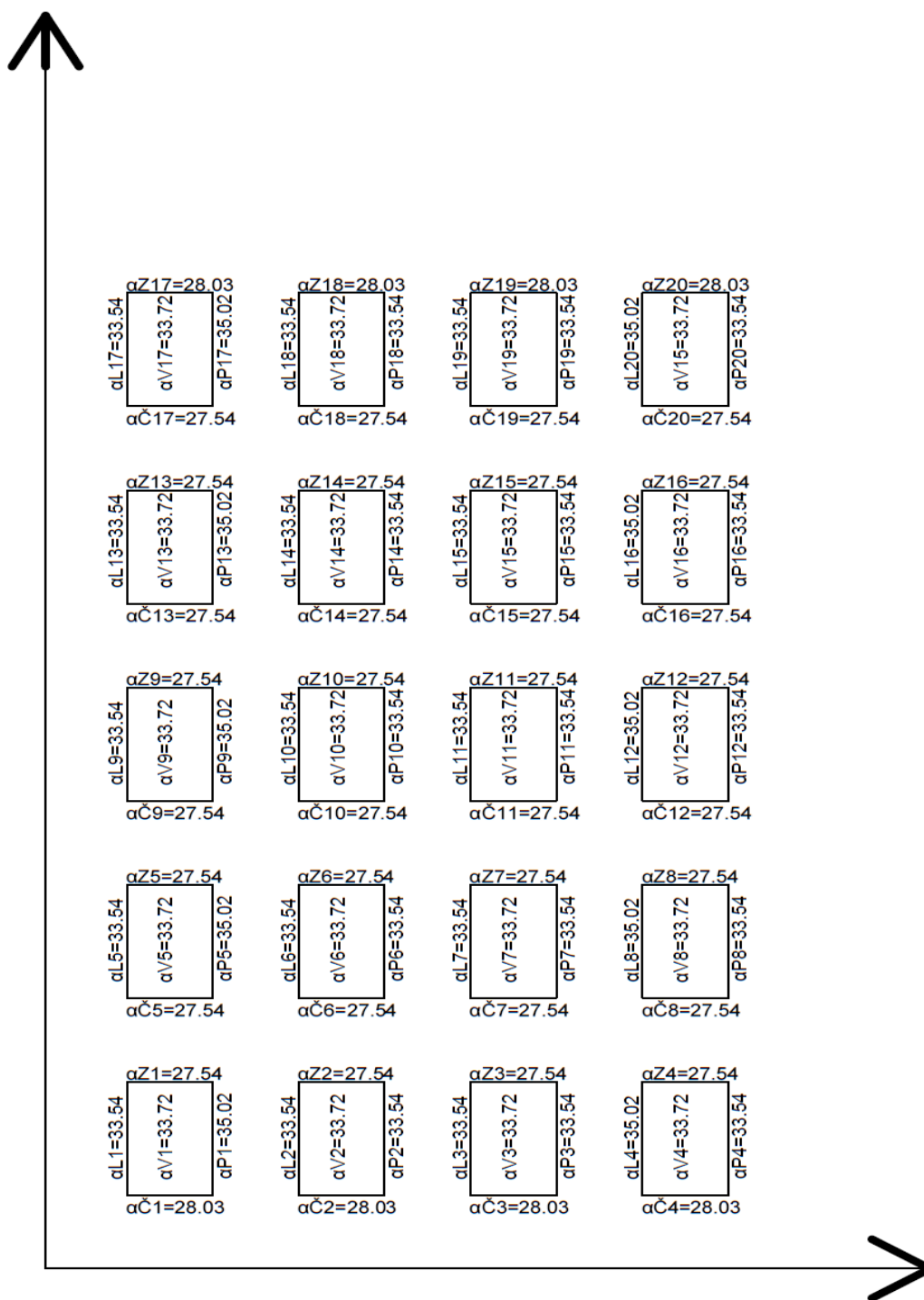
Obr. 18 – Rychlostní pole 2 m/s pohled z boku



Obr. 19 – Rychlostní pole 2 m/s pohled z čela

Na obr. 18 a 19 je zobrazeno rychlostní pole v podélném a kolmém řezu sušící komorou. Z výsledků rychlostí je vidět oprávněný předpoklad, že stěny sušící komory neovlivňují rychlostní pole v blízkosti stěny kostky. Dále je zde vidět vytvoření laminární podvrstvy u povrchu kostek.

Zobrazení součinitelů přestupů tepla v geometrii, směr proudění ve směru osy  $y$ , indexy představují L – levá, P – pravá, Č – čelo, Z – zadní, V – vrchní a čísla označují pořadí kostek. Hodnoty součinitelů přestupu tepla byly získány programem Ansys FLUENT manuálně pro každou stěnu kostky zvlášť.



Obr. 20 – Přiřazené součinitele přestupu tepla k jednotlivým kostkám



Tabulka vypočtených součinitelů přestupu tepla  $[\frac{W}{m^2K}]$  pro rychlost  $2 \frac{m}{s}$ :

	kostka 1	kostka 5	kostka 9	kostka 13	kostka 17
Čelo	28.04	27.54	27.54	27.54	27.54
Dno	34.11	34.11	34.11	34.11	34.11
Vršek	33.72	33.72	33.72	33.72	33.72
Bokp	35.02	35.02	35.02	35.02	35.02
Bokl	33.54	33.54	33.54	33.54	33.54
Zadek	27.54	27.54	27.54	27.54	28.04
AVG	32.00	31.91	31.91	31.91	32.00
	kostka 2	kostka 6	kostka 10	kostka 14	kostka 18
Čelo	28.04	27.54	27.54	27.54	27.54
Dno	34.11	34.11	34.11	34.11	34.11
Vršek	33.72	33.72	33.72	33.72	33.72
Bokp	33.54	33.54	33.54	33.54	33.54
Bokl	33.54	33.54	33.54	33.54	33.54
Zadek	27.54	27.54	27.54	27.54	28.04
AVG	31.75	31.67	31.67	31.67	31.75
	kostka 3	kostka 7	kostka 11	kostka 15	kostka 19
Čelo	28.04	27.54	27.54	27.54	27.54
Dno	34.11	34.11	34.11	34.11	34.11
Vršek	33.72	33.72	33.72	33.72	33.72
Bokp	33.54	33.54	33.54	33.54	33.54
Bokl	33.54	33.54	33.54	33.54	33.54
Zadek	27.54	27.54	27.54	27.54	28.04
AVG	31.75	31.67	31.67	31.67	31.75
	kostka 4	kostka 8	kostka 12	kostka 16	kostka 20
Čelo	28.04	27.54	27.54	27.54	27.54
Dno	34.11	34.11	34.11	34.11	34.11
Vršek	33.72	33.72	33.72	33.72	33.72
Bokp	33.54	33.54	33.54	33.54	33.54
Bokl	35.02	35.02	35.02	35.02	35.02
Zadek	27.54	27.54	27.54	27.54	28.04
AVG	32.00	31.91	31.91	31.91	32.00

Tab. 2 – Výsledné součinitele přestupu tepla z programu ANSYS

AVG čela	27.6397826
AVG vršek	33.7215832
AVG Bokp	33.9131398
AVG Bokl	33.9132476
AVG Zadek	27.6399163
AVG ALL	31.8224711

Tab. 3 – Průměrné hodnoty z tab. 2

Z tabulek je zřejmé, že se hodnoty součinitelů přestupu tepla na jednotlivých kostkách neliší, nicméně nejvyšší hodnoty jsou na vrchních a bočních stěnách, což se dalo předpokládat, neboť zde nebyl proud vzduchu významně narušen.

## 8. Výpočet součinitele přestupu tepla pomocí korelace

Pro první analytický výpočet byla vrchní stěna brána jako nekonečná deska. Byla použita následující korelace [14]:

$$Nu = 0,664 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33} \quad (56)$$

Která platí v rozsahu:

$$Re < 5 \cdot 10^5$$

$$0,6 < Pr < 60$$

Nejprve bylo vypočteno Reynoldsovo číslo pro proudění okolo vrchní stěny kostky cukru:

$$Re_2 = \frac{uL}{\nu} = \frac{2 \cdot 27 \cdot 10^{-3}}{2,12 \cdot 10^{-5}} = 2545 \quad (57)$$

Prandtlovo číslo bylo vypočteno ve vztahu (55).

Z výsledků těchto bezrozměrných čísel tedy vyplývá, že je možné použít výše uvedenou korelaci pro výpočet Nusseltova čísla a následně vypočíst i součinitel přestupu tepla na vrchní stěně kostky.

$$Nu = 0,664 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33} = 0,664 \cdot 2545^{0,5} \cdot 0,728^{0,33} = 33,21 \quad (58)$$

A dále součinitel přestupu tepla:

$$\alpha_{COR} = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} = \frac{33,21 \cdot 0,0293}{0,027} = 29,77 \frac{W}{m^2K} \quad (59)$$

Nyní budou porovnány součinitele přestupu tepla z analytického výpočtu se součiniteli přestupu tepla z výpočtu pomocí programu ANSYS FULENT. Z programu ANSYS FLUENT budou brány průměrné hodnoty součinitelů přestupu tepla na vrchních stěnách kostek. S ohledem na analytický výpočet, který simuluje proudění okolo stěny desky, je pro následující výpočty uvažován součinitel přestupu tepla z vrchní stěny kostky.

Odchylka simulace a korelačního vztahu je 13% nicméně pro účely použitelnosti navrženého modelu je jeho přesnost predikce dostačující vzhledem k uvažovaným zjednodušením.

$$\alpha_{COR} = 29,77 \frac{W}{m^2K}$$

$$\alpha_{ANSYS} = 33,72 \frac{W}{m^2K}$$

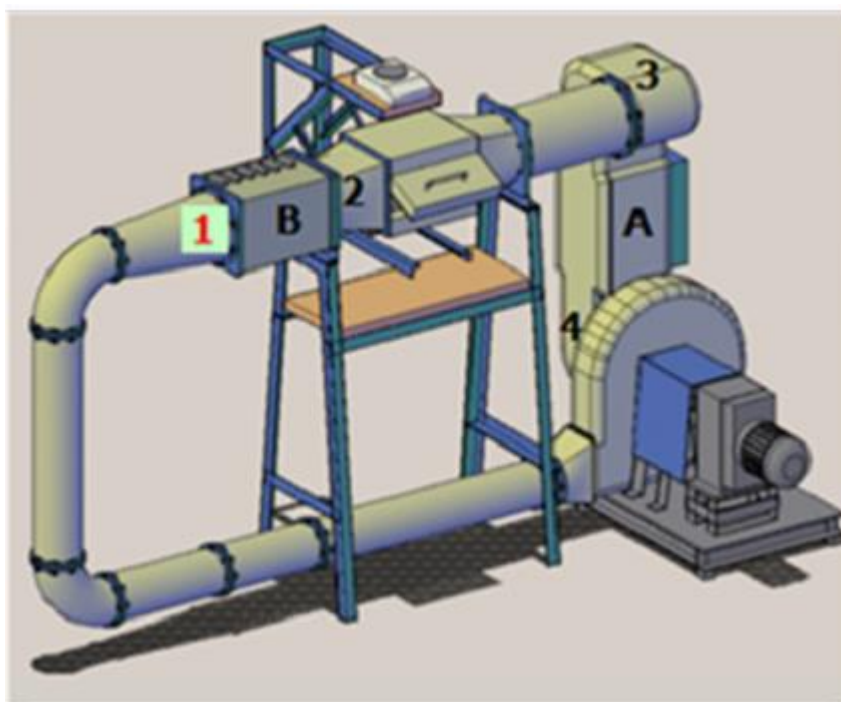
## 9. Laboratorní měření

Pro výpočet součinitele přestupu hmoty  $\beta$ , bylo nutné udělat laboratorní měření, ze kterých lze zjistit difuzní koeficienty vody, z kostky cukru, do vzduchu. Celkem byla provedena 3 měření.

### 9.1 Příprava měření

Měření probíhalo v laboratořích ČVUT Fakulty strojní, ústavu Procesní a zpracovatelské techniky. Byla použita konvektivní vsádková sušárna.

Schéma sušárny je následující:



Obr. 21 – schéma konvektivní sušárny

V prostorách označených na obr. 21 písmeny A a B dochází k ohřevu vzduchu pomocí kaloriferů, na místech označených čísly jsou umístěny snímače teploty. Pomocí senzoru 2 byla regulována teplota sušícího vzduchu.

Pro experiment byly použity kostky od firmy Tereos TTD a.s., balení s kostkami je možno vidět na obr. 22.



Obr. 22 – sušené kostky cukru

Hmotnost jedné kostky je  $6 \pm 0,2 \text{ g}$ . Rozměry  $27 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$  (délka x šířka x výška).

Rychlost proudění v sušárně byla  $2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . Rozměry komory sušárny, do které byly umístěny vzorky, odpovídají rozměrům modelu v programu ANSYS FLUENT. Podložka, na které jsou kostky položeny, je v programu ANSYS FLUENT nahrazena rovnou deskou.

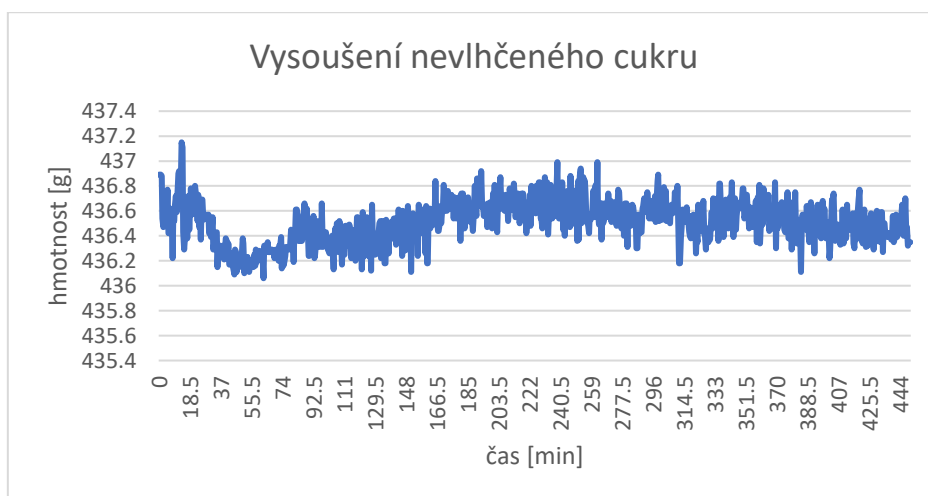
K měření byl používán program SUŠÁRNA\_v5.vi dostupný na počítači přiřazenému k pracovišti.

Každá z kostek byla před experimentem zvážena a namočena tak, aby obsahovala 5% vody. Voda do kostek byla vpravována pomocí injekční stříkačky. Takto namočené kostky byly dále uzavřeny do utěsněné nádoby a ponechány alespoň 24 hodin, aby došlo k rovnoměrnému rozložení vody v kostce. Na obr. 23 je možno vidět, jak probíhalo vážení kostek probíhající na váze KERN PCB, která váží s přesností na 0,001g. Pro každé měření byly použity nové kostky cukru.



Obr. 23 – vážení kostek

Ještě před prvním navlhčením kostek bylo provedeno zkušební měření, jehož úkolem bylo zjistit, zda jsou kostky před namočením dostatečně vysušené a neobsahují volnou vodu. Suché kostky byly tedy vloženy do sušicí komory a bylo prováděno jejich vysoušení při teplotě  $80^{\circ}\text{C}$  a rychlosti sušicího vzduchu  $4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . Na obr. 24 je vidět, že nedocházelo k znatelnému úbytku hmotnosti, a proto toto vysoušení nebylo nutné vykonávat před dalšími měřeními. Kostky byly navlhčovány na  $c_0^m = 5 \%$ .



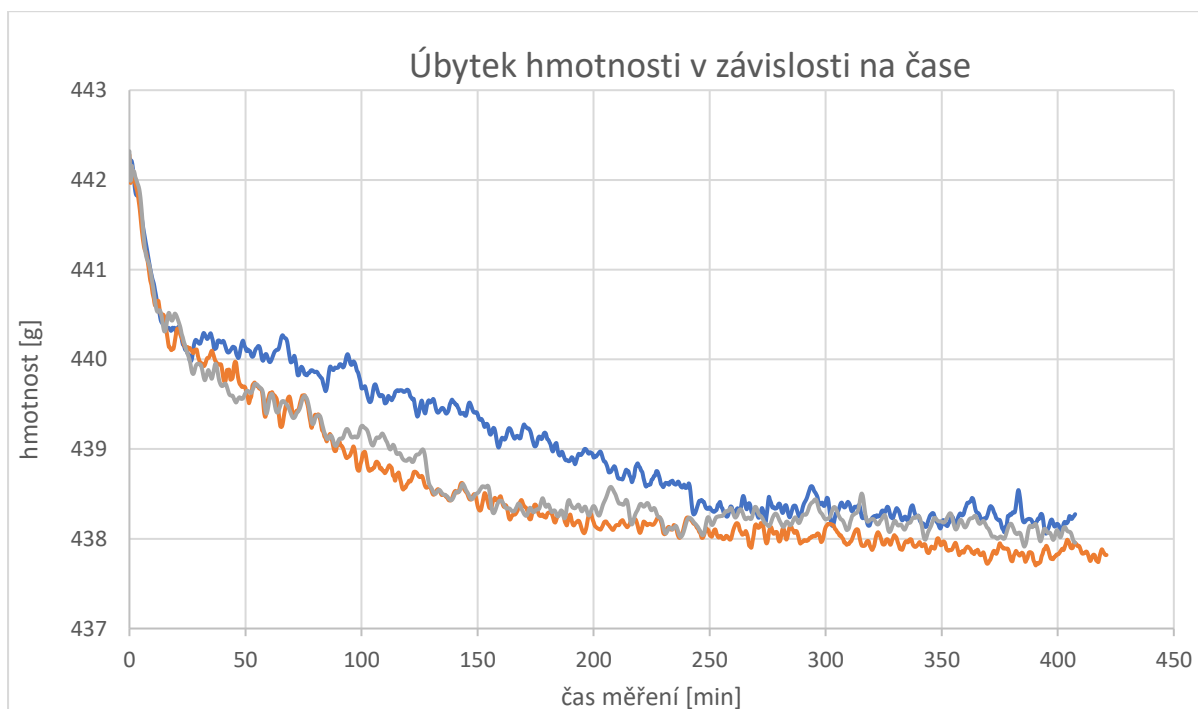
Obr. 24 – vysoušení nevlhčeného cukru

## 9.2 Měření

Před spuštěním měření byly kostky vyjmuty z uzavřeného obalu a vloženy do drátěného koše používaného při jejich sušení. Rozestupy kostek odpovídají rozestupům dle obr. 2 (schéma geometrie). Nejprve byla sušárna přehřáta na danou teplotu 80°C a poté do ní byly vloženy kostky v koši. Délka každého měření byla přes 6,5 hodiny. Koš vložený do sušárny byl zavěšen na váhu, která snímala hmotnost a ukládala ji každých 30 sekund měření. Váha použitá při snímání hmotnosti měří s přesností na 0,001g, typ váhy je VIBRA AJ.

## 9.3 Vyhodnocení měření

Po provedení všech měření byla data vložena do programu Microsoft excel a dále zpracovávána. Na následujícím grafu je zobrazen úbytek hmotnosti v závislosti na čase u všech měření:



Obr. 25 – úbytek hmotnosti v závislosti na čase

Poté bylo nutné pro další výpočty zjistit závislost bezrozměrné vlhkosti na čase. Bezrozměrná vlhkost byla vypočtena následovně:



$$W_A = \frac{W_{A\tau} - W_e}{W_0 - W_e} \quad (60)$$

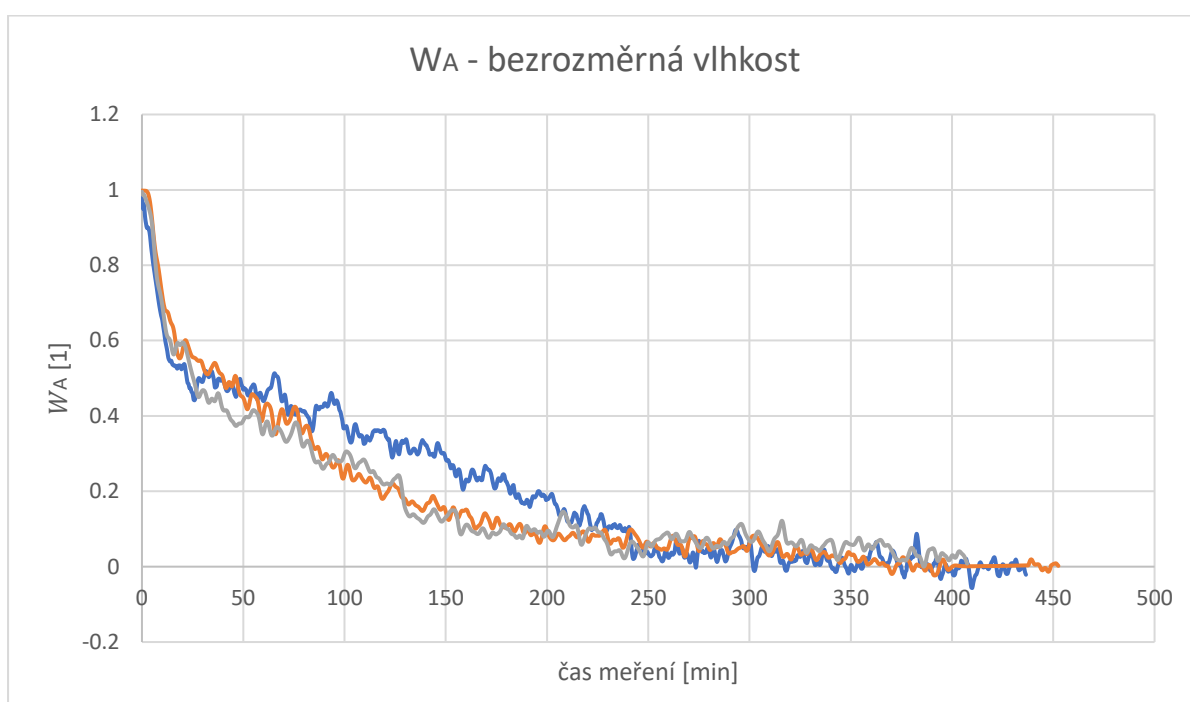
Kde:

$W_{A\tau}$  – aktuální vlhkost

$W_e$  – konečná vlhkost

$W_0$  – počáteční vlhkost

Na obr. 26 je tedy zobrazena bezrozměrná vlhkost  $W_A$  v závislosti na čase.

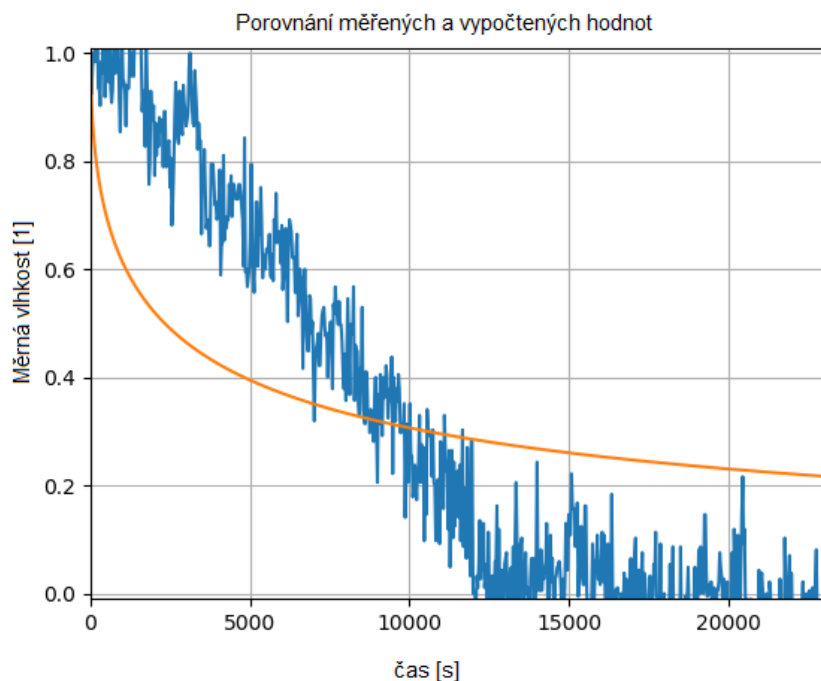


Obr. 26 – bezrozměrná vlhkost v závislosti na čase

## 10. Výpočty z měření

### 10.1 Výpočet difuzního koeficientu $D_{ef}$ analytickou metodou

Hlavním cílem měření tedy bylo zjistit difuzní koeficient vody do vzduchu z kostky cukru. Nejprve byl problém řešen analytickou metodou popsanou v části 4.2, k řešení byl použit programovací jazyk Python, skript je přiložen v příloze 1.



Obr. 27 – průběhy sušení kostek – analytická metoda

Oranžová křivka byla vygenerována pomocí analytické metody a modrá křivka byla vytvořena pomocí měření. Z obrázku lze vidět, že křivky si příliš neodpovídají.

Difuzní koeficient, který byl vypočten pomocí analytické metody je:

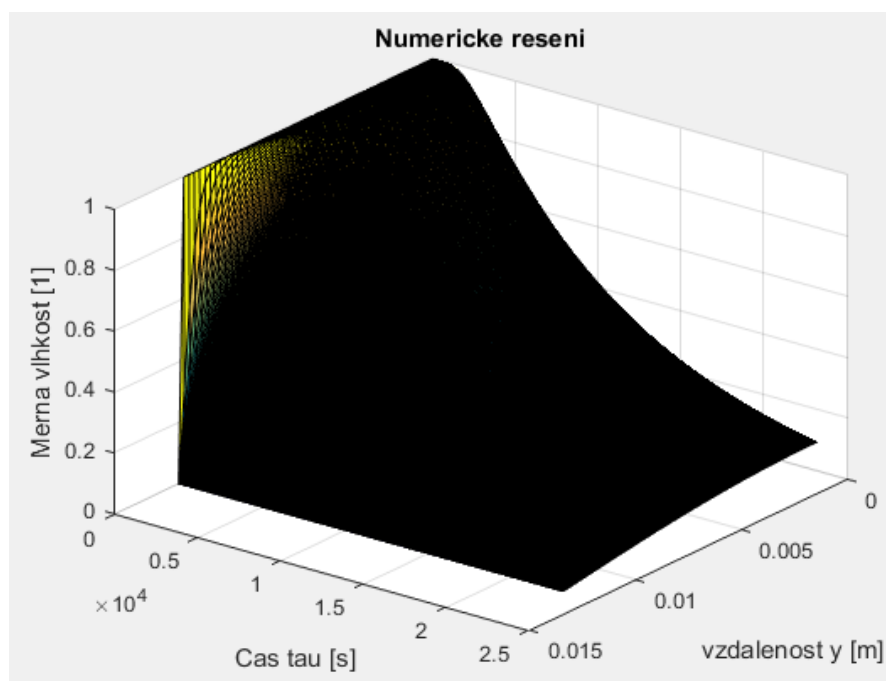
$$D_{ef\_ANAL} = 4,88 \cdot 10^{-10} \frac{m^2}{s}$$

Tento výsledek ovšem příliš neodpovídá předpokládaným výsledkům a lze ho považovat za velmi nepřesný.

## 10.2 Výpočet difuzního koeficientu $D_{ef}$ numerickou metodou

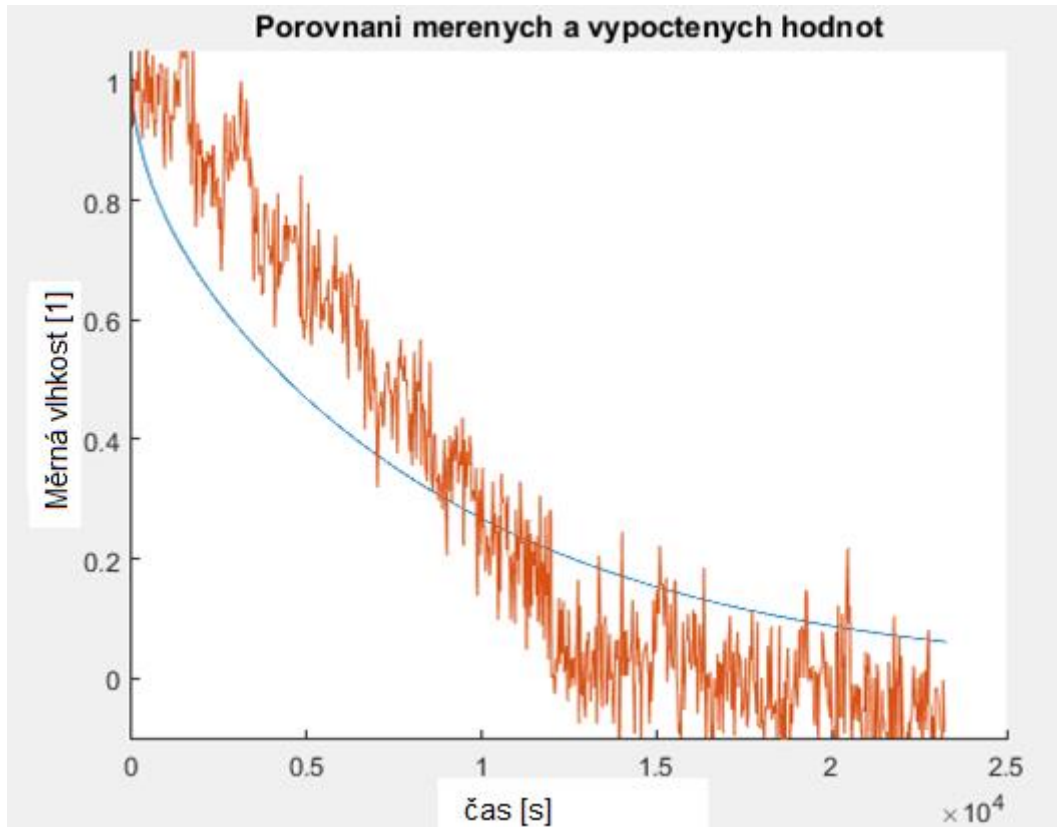
Další zvolená metoda byla numerická, popsaná v části 4.3. Pro toto řešení byl tedy vypracován skript v programu Matlab (v příloze 2), který ovšem nepracoval dle předpokladů. Bylo zjištěno, že při použití dvou okrajových podmínek třetího druhu, výpočet parciální diferenciální rovnice nekonverguje, resp. výsledek konvergoval k náhodné hodnotě řešení, která ale neodpovídala popisu chování reálného procesu. Byla tedy použita varianta, předpoklad druhé fáze sušení, kde druhá okrajová podmínka byla rovna 0. Tato okrajová podmínka určuje, že na povrchu kostky je uvažována stále nulová relativní vlhkost  $W_A^*$ .

Vzhledem k tomu, že výsledek na obr. 28 poskytuje informaci o rozložení vlhkosti v čase a prostoru kostky, ale experimentální data jsou měřena jen jako celková vlhkost v čase, bylo nutné pro každý časový krok získat celkové množství vlhkosti v kostce v daném čase, tedy jeden bod v závislosti získané experimentálně. Na základě sumy nejmenších čtverců došlo k fitování dat z měření s daty z matematického modelu. Fitování probíhalo pomocí změny velikosti difuzního koeficientu  $D_{ef}$ . Jeho hodnota je pro druhou fázi sušení předpokládána konstantní.



Obr. 28 – 3D graf průběhu vysoušení dle numerického řešení

Na obr. 29 je možno vidět průběh sušení, který je uvažován pouze jako druhá fáze sušení. Průběh sušení oranžové křivky je dle naměřených dat a průběh sušení podle křivky modré je na základě výše uvedeného matematického modelu.



Obr. 29 – průběhy sušení kostek – numerická metoda

Výsledný difuzní koeficient tedy je:

$$D_{ef} = 6,55 \cdot 10^{-9} \frac{m^2}{s}$$

Tento výsledek již odpovídá difuzním koeficientům z tab. 1, a lze ho považovat za uspokojivý.

### 10.3 Výpočet součinitele přestupu hmoty $\beta$

Dále již tedy bylo možné vypočítat hodnoty součinitele přestupu hmoty  $\beta$  pomocí součinitele přestupu tepla získaného z analytického výpočtu a z výpočtu pomocí programu ANSYS. Úpravou následující rovnice dostáváme vztah pro výpočet  $\beta$  [15]:

$$Sh = Nu \left( \frac{Sc}{Pr} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (61)$$

Kde:

$$Sh = \frac{\beta L}{D_{ef}}$$

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda}$$

$$Sc = \frac{\nu}{D_{efW}}$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda}$$

Po dosazení lze tedy napsat:

$$\frac{\beta L}{D_{ef}} = \frac{\alpha L}{\lambda} \left( \frac{\frac{\eta}{\rho D_{efW}}}{\frac{c_p \eta}{\lambda}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (62)$$

Nyní lze vyjádřit součinitel přestupu hmoty  $\beta$ :

$$\beta = \alpha \frac{D_{ef}}{\lambda} \left( \frac{\frac{\lambda}{\rho c_p}}{D_{efW}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (63)$$

1. Korelační výpočet pro nekonečnou desku  $\alpha$ :

$$\beta = \alpha_{COR} \frac{D_{ef}}{\lambda_{80}} \left( \frac{\frac{\lambda_{80}}{\rho_{80} c_{p_{80}}}}{D_{efW}} \right)^{\frac{1}{3}} = 29,77 \frac{6,55 \cdot 10^{-9}}{0,0293} \left( \frac{\frac{0,0293}{0,986 \cdot 1020}}{3,4 \cdot 10^{-5}} \right)^{\frac{1}{3}} = 6,32 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

2. Výpočet  $\alpha$  z programu ANSYS:

$$\beta = \alpha_{ANSYS} \frac{D_{ef}}{\lambda_{80}} \left( \frac{\frac{\lambda_{80}}{\rho_{80} c_{p_{80}}}}{D_{AB}} \right)^{\frac{1}{3}} = 33,72 \frac{6,55 \cdot 10^{-9}}{0,0293} \left( \frac{\frac{0,0293}{0,986 \cdot 1020}}{3,4 \cdot 10^{-5}} \right)^{\frac{1}{3}} = 7,16 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

## 11. Změny vzdálenosti kostek

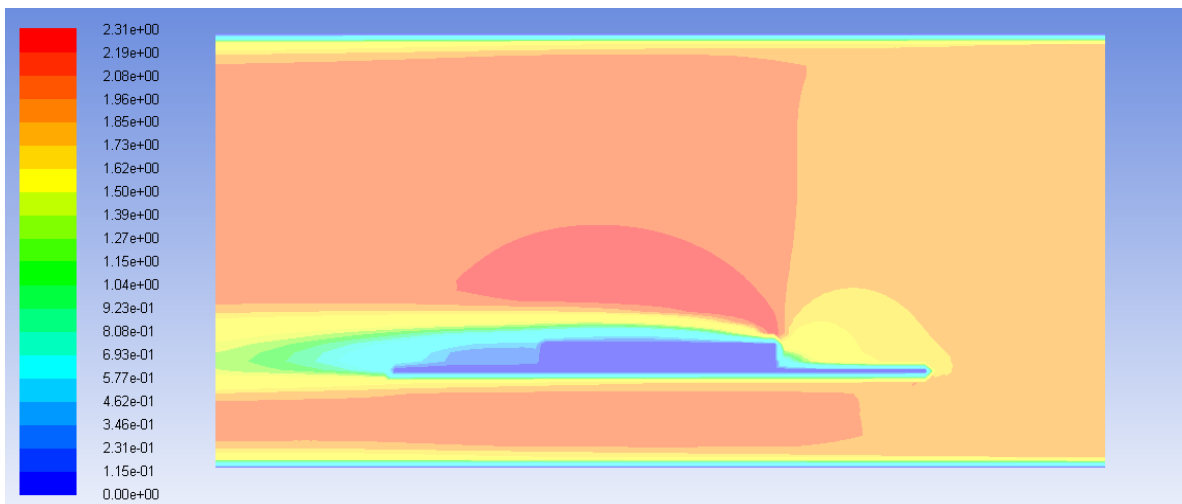
Další část diplomové práce se zabývá simulacemi v programu Ansys FLUENT s různými vzdálenostmi mezi kostkami cukru. Po provedených simulacích následuje výpočet součinitele přestupu tepla a z něho výpočet součinitele přestupu hmoty, poté jeho porovnání s původním rozestavením kostek a stanovení optimálního rozložení kostek na sušící desce. Kvůli nedostatečným rozměrům původního čtvercového kanálu pro sušení kostek byly tyto rozměry zvětšeny na šířku 260 mm, výšku 200 mm a délku 500 mm. Kostky se při zvětšení rozestupů do původního kanálu nevešly. Podložce, na které jsou kostky položeny, byly přiřazeny rozměry: šířka 220 mm, výška 1 mm délka 330 mm. Tyto rozměry byly voleny s ohledem na složitost sítě v programu Ansys FLUENT.

Opět byly provedeny simulace rychlostního pole při rychlosti  $2 \frac{m}{s}$ . Poté následoval výpočet součinitele přestupu tepla stále za pomoci programu ANSYS Fluent. Stejně jako v předchozím případě byla hodnota tepelné vodivosti cukru zvolena následovně:  $\lambda = 1 \cdot 10^{-24} \frac{W}{mK}$ .

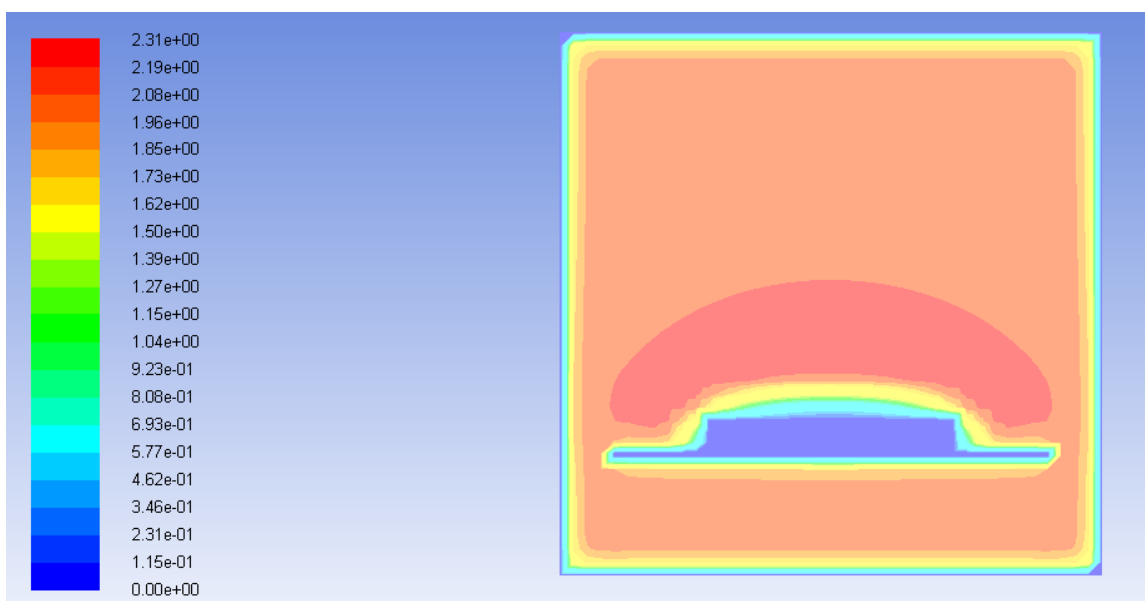
Také byla provedena rešerše v oblasti distribuce sušených objektů v sušárně, avšak nepodařilo se nalézt žádná odpovídající měření ani články, která by se touto problematikou zabývala.

## 11.1 Minimalizace vzdáleností mezi kostkami

V další části proběhla simulace kostek cukru tak, že jejich rozestupy byly co nejmenší, tudíž lze malé kostky uvažovat jako jednu větší kostku. Na obr. 30 a obr. 31 je možné vidět rychlostní pole simulovaná programem ANSYS Fluent. Po simulaci rychlostních polí opět nastávala fáze simulace přestupu tepla a následného získání součinitele přestupu tepla.



Obr. 30 – velká kostka – pohled z boku



Obr. 31 – velká kostka – pohled z čela



V tab. 4 jsou zobrazeny velikosti součinitelů přestupu tepla jedné velké kostky.

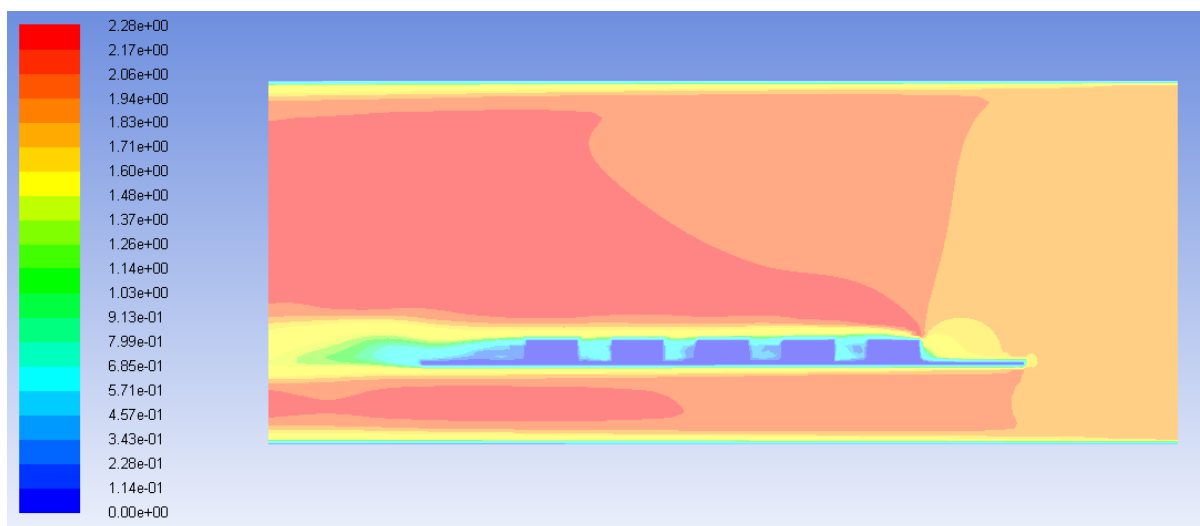
Kostky bez mezer	
Čelo	16.09712
Vršek	15.35575
Bokp	15.22875
Bokl	15.2286
AVG ALL	15.47756

Tab. 4 - Výsledné součinitele přestupu tepla z programu ANSYS

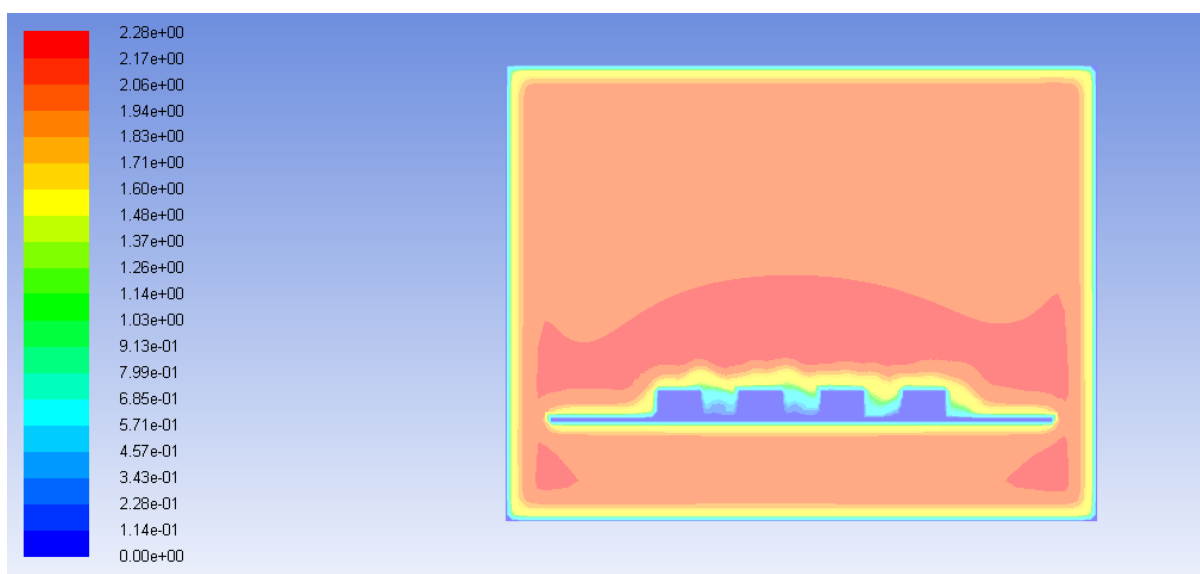
S ohledem na analytický výpočet, který simuluje proudění okolo stěny desky, je pro následující výpočty uvažován součinitel přestupu tepla z vrchní stěny kostky stejně tak, jako tomu bylo v předchozím případě a bude i v následujících případech.

## 11.2 Původní rozestavení

Původní rozestavení bylo vypočteno znovu, ovšem již s jinými rozměry kanálu. Na obr. 32 a 33 je zobrazeno rychlostní pole a v tab. 5 a 6 velikosti součinitelů přestupu tepla.



Obr. 32 – původní vzdálenost – pohled z boku



Obr. 33 – původní vzdálenost – pohled z čela

Kostky rozestupy původní					
	kostka 1	kostka 5	kostka 9	kostka 13	kostka 17
Čelo	22.86	23.11	21.95	22.20	23.26
Vršek	23.48	24.70	24.86	24.79	25.38
Bokp	21.40	23.09	23.64	24.09	24.53
Bokl	23.94	25.21	21.39	21.01	23.22
Zadek	20.91	20.63	20.58	20.82	20.48
AVG	22.52	23.35	22.48	22.58	23.37
	kostka 2	kostka 6	kostka 10	kostka 14	kostka 18
Čelo	22.86	22.73	21.32	21.94	21.84
Vršek	23.33	24.50	24.53	24.55	24.12
Bokp	21.81	21.13	22.03	22.32	20.03
Bokl	23.54	24.84	20.50	19.94	18.51
Zadek	20.71	20.69	20.22	20.87	18.97
AVG	22.45	22.78	21.72	21.93	20.69
	kostka 3	kostka 7	kostka 11	kostka 15	kostka 19
Čelo	22.87	21.80	22.27	20.96	20.17
Vršek	23.17	24.01	24.62	24.58	23.41
Bokp	22.00	20.75	21.87	21.48	20.18
Bokl	22.96	23.55	21.39	18.88	20.21
Zadek	20.47	20.88	19.28	21.15	18.53
AVG	111.47	110.99	109.42	107.06	102.49
	kostka 4	kostka 8	kostka 12	kostka 16	kostka 20
Čelo	22.89	22.09	22.78	23.19	23.58
Vršek	23.34	24.09	25.10	25.51	25.67
Bokp	22.52	21.15	21.36	22.78	23.55
Bokl	21.71	23.25	24.72	24.99	23.22
Zadek	20.90	20.69	20.90	21.04	20.69
AVG	22.27	22.25	22.97	23.50	23.34

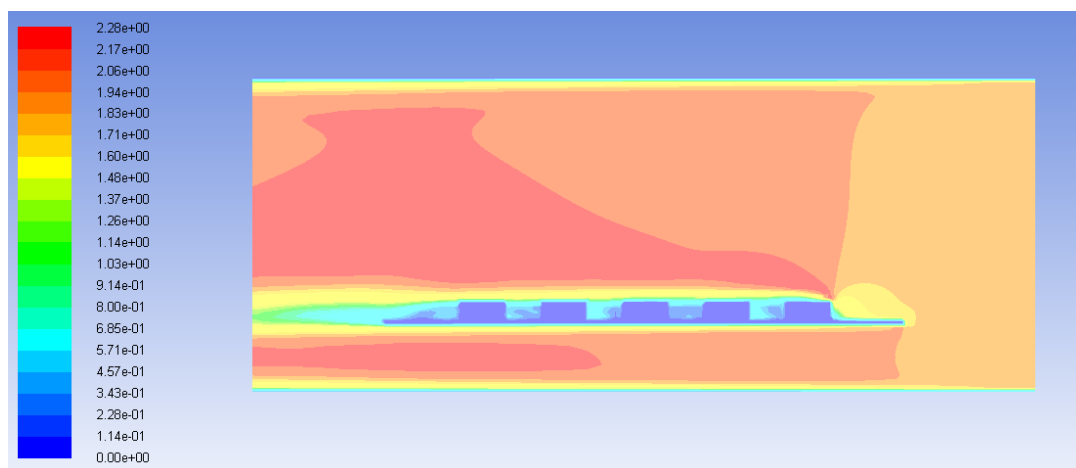
Tab. 5 – Výsledné součinitele přestupu tepla z programu ANSYS

AVG čela	22.3343376
AVG vršek	24.3863541
AVG Bokp	22.0852282
AVG Bokl	22.2853249
AVG Zadek	20.4695143
AVG ALL	22.3246818

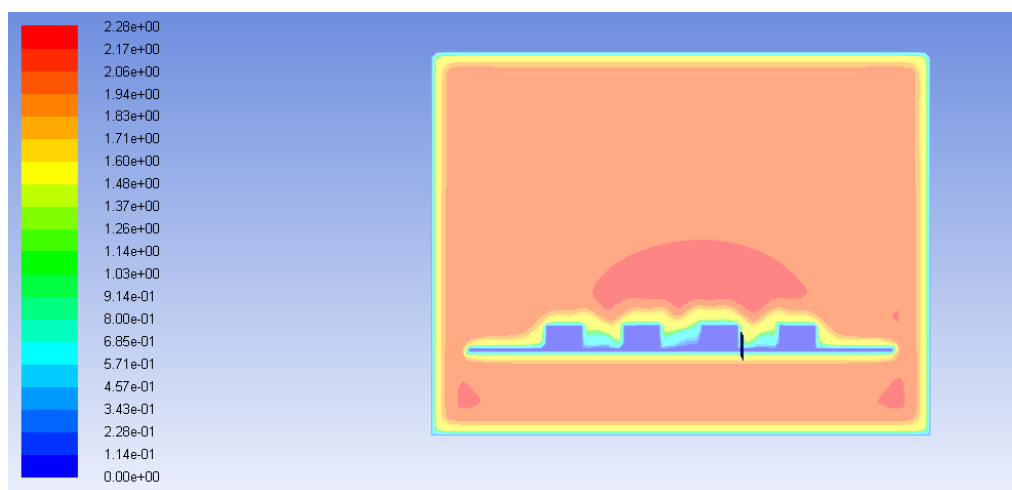
Tab. 6 – Průměrné hodnoty součinitele přestupu tepla z tab. 5

## 11.3 Zvětšení vzdálenosti 1,25x

Dále bylo pracováno se změnou vzdálenosti 1,25x větší než průvodní rozestavení. Na obr. 34 a 335 je možné vidět rychlostní pole a v tab. 7 a 8 pak velikosti součinitelů přestupu tepla.



Obr. 34 – vzdálenost 1,25x – pohled z boku



Obr. 35 – vzdálenost 1,25x – pohled z čela

Kostky rozestupy 1.25

	kostka 1	kostka 5	kostka 9	kostka 13	kostka 17
Čelo	22.74	23.24	23.51	23.54	23.46
Vršek	23.23	24.72	25.28	25.29	24.98
Bokp	22.28	23.99	24.75	24.71	25.45
Bokl	22.97	22.30	24.63	24.80	24.69
Zadek	21.49	21.22	21.36	21.34	20.75
AVG	22.54	23.10	23.91	23.93	23.87
	kostka 2	kostka 6	kostka 10	kostka 14	kostka 18
Čelo	22.73	23.52	21.23	22.84	22.63
Vršek	23.14	24.62	24.02	24.83	25.03
Bokp	23.67	25.88	23.92	23.90	22.90
Bokl	22.85	23.16	20.86	23.50	23.89
Zadek	21.13	19.39	21.04	20.22	20.24
AVG	22.70	23.31	22.21	23.06	22.93
	kostka 3	kostka 7	kostka 11	kostka 15	kostka 19
Čelo	22.72	22.90	23.12	22.96	22.40
Vršek	23.03	24.78	24.97	25.14	24.88
Bokp	23.10	22.35	24.78	24.17	23.19
Bokl	23.55	25.94	25.49	23.56	22.46
Zadek	21.04	21.44	21.18	20.43	19.23
AVG	113.43	117.41	119.53	116.26	112.17
	kostka 4	kostka 8	kostka 12	kostka 16	kostka 20
Čelo	22.74	23.16	23.76	23.66	23.14
Vršek	23.23	24.78	25.33	25.50	25.37
Bokp	22.94	22.39	24.59	24.62	25.29
Bokl	22.28	24.08	24.77	24.28	24.74
Zadek	21.49	21.25	21.32	21.22	20.86
AVG	22.53	23.13	23.95	23.86	23.88

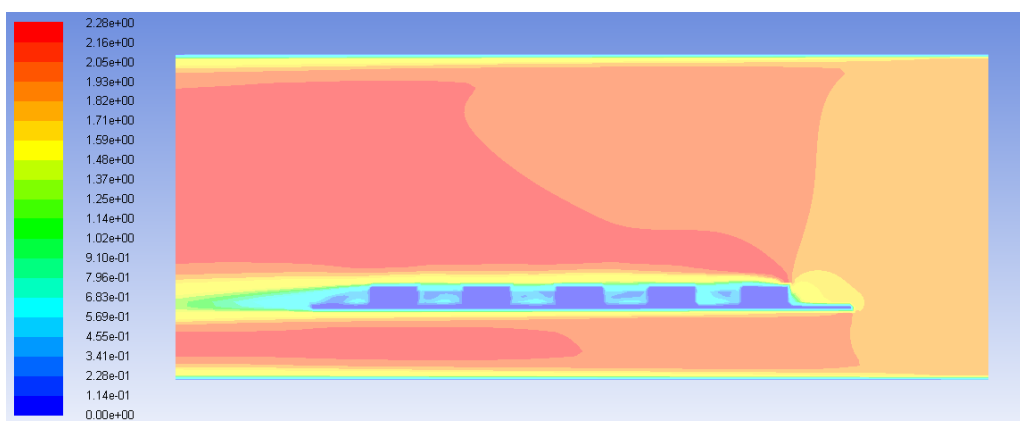
Tab. 7 – Výsledné součinitele přestupu tepla z programu ANSYS

AVG čela	23.0001341
AVG vršek	24.6076872
AVG Bokp	23.9440464
AVG Bokl	23.7869069
AVG Zadek	20.8812661
AVG ALL	23.2346214

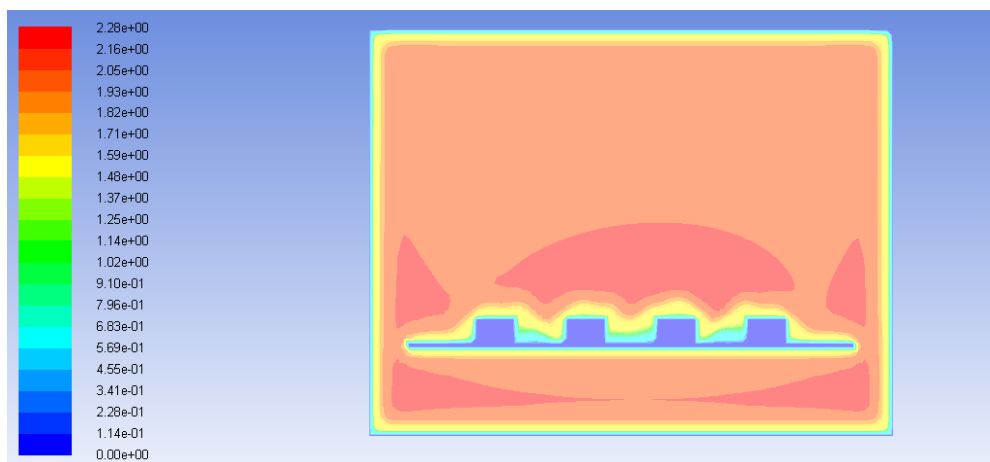
Tab. 8 – Průměrné hodnoty součinitele přestupu tepla z tab. 7

## 11.4 Zvětšení vzdálenosti 1,5x

V následujícím rozestavení byly vzdálenosti zvětšeny 1,5x oproti původním. Na obr. 36 a 37 jsou vidět, stejně jako v předchozích případech, rychlostní pole a v tab. 9 a 10 pak součinitele přestupu tepla.



Obr. 36 – vzdálenost 1,5x – pohled z boku



Obr. 37 – vzdálenost 1,5x – pohled z čela

Kostky rozestupy 1.5					
	kostka 1	kostka 5	kostka 9	kostka 13	kostka 17
Čelo	22.19	22.82	22.74	22.64	22.49
Vršek	23.12	25.11	25.48	25.71	25.69
Bokp	22.72	24.67	25.34	25.17	25.29
Bokl	21.77	21.55	23.73	23.17	23.97
Zadek	19.90	19.64	19.46	19.73	19.93
AVG	21.94	22.76	23.35	23.29	23.47
	kostka 2	kostka 6	kostka 10	kostka 14	kostka 18
Čelo	22.19	22.89	21.45	22.13	21.74
Vršek	23.08	24.86	24.89	25.18	25.31
Bokp	22.52	24.34	23.89	23.17	23.16
Bokl	21.64	23.54	22.77	23.09	23.35
Zadek	19.76	19.85	19.89	19.70	19.75
AVG	21.84	23.10	22.58	22.65	22.66
	kostka 3	kostka 7	kostka 11	kostka 15	kostka 19
Čelo	22.20	22.62	22.03	21.96	21.32
Vršek	22.89	25.30	25.17	25.05	25.11
Bokp	22.03	22.87	24.19	23.48	22.65
Bokl	22.30	24.36	23.95	21.84	21.37
Zadek	19.52	19.97	19.60	19.76	19.73
AVG	21.79	23.02	22.99	22.42	22.04
	kostka 4	kostka 8	kostka 12	kostka 16	kostka 20
Čelo	22.19	22.81	22.41	22.26	22.66
Vršek	23.12	25.15	25.35	25.75	25.86
Bokp	21.75	21.34	23.95	23.65	23.73
Bokl	22.75	24.62	25.07	25.10	25.31
Zadek	19.89	19.63	19.53	19.72	19.78
AVG	21.94	22.71	23.26	23.30	23.47

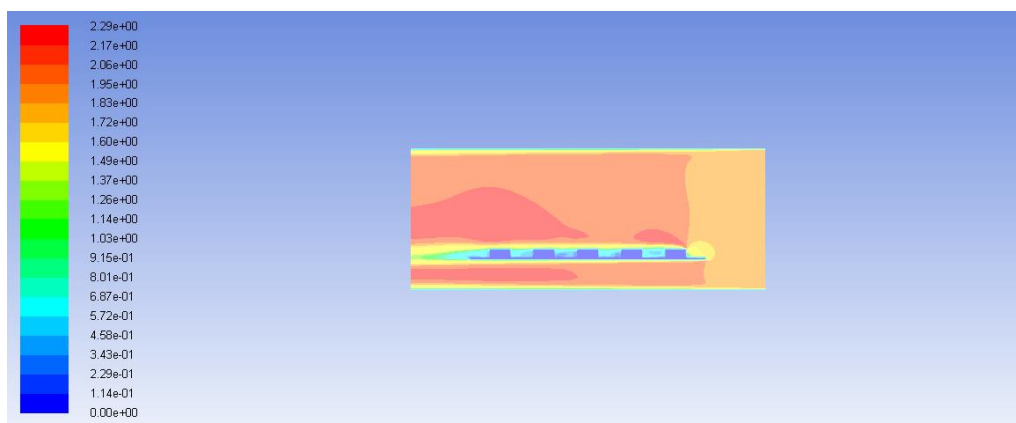
Tab. 9 – Výsledné součinitele přestupu tepla z programu ANSYS

AVG čela	22.2879921
AVG vršek	24.8589748
AVG Bokp	23.495963
AVG Bokl	23.34829674
AVG Zadek	19.73658575
AVG ALL	22.72849073

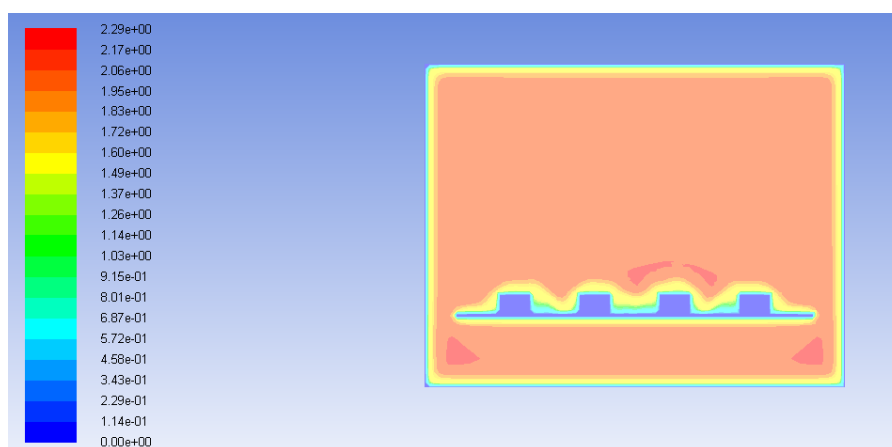
Tab. 10 – Průměrné hodnoty součinitele přestupu tepla z tab. 9

## 11.5 Zvětšení vzdálenosti 1,75x

Poslední modifikací vzdáleností bylo zvětšení 1,75x ve srovnání se základními mezerami. Na obr. 38 a 39 jsou zobrazena rychlostní pole a v tab. 11 a 12 součinitele přestupu tepla.



Obr. 38 – vzdálenost 1,75x – pohled z boku



Obr. 39 – vzdálenost 1,75x – pohled z čela



Kostky rozestupy 1.75					
	kostka 1	kostka 5	kostka 9	kostka 13	kostka 17
Čelo	23.66	24.05	23.11	23.49	23.64
Vršek	22.87	25.65	25.51	25.85	26.01
Bokp	21.68	23.87	23.97	23.29	24.39
Bokl	22.35	23.47	24.41	24.60	24.12
Zadek	20.51	20.36	20.12	20.19	21.55
AVG	22.21	23.48	23.42	23.48	23.94
	kostka 2	kostka 6	kostka 10	kostka 14	kostka 18
Čelo	23.64	23.86	22.73	22.86	22.97
Vršek	22.79	25.11	25.24	25.38	25.64
Bokp	22.73	25.00	24.34	24.11	23.93
Bokl	22.18	24.55	24.14	24.49	24.88
Zadek	20.42	20.37	20.30	20.05	21.47
AVG	22.35	23.78	23.35	23.38	23.78
	kostka 3	kostka 7	kostka 11	kostka 15	kostka 19
Čelo	23.64	23.87	23.22	22.37	22.65
Vršek	22.81	25.50	25.65	25.03	25.61
Bokp	22.22	24.38	24.62	24.52	24.71
Bokl	22.66	24.77	24.36	23.49	22.44
Zadek	20.39	20.29	20.19	19.83	21.43
AVG	111.72	118.80	118.04	115.24	116.85
	kostka 4	kostka 8	kostka 12	kostka 16	kostka 20
Čelo	23.65	23.97	23.20	23.29	23.95
Vršek	22.85	25.60	25.52	25.79	26.05
Bokp	22.32	23.08	24.33	24.82	24.01
Bokl	21.49	23.84	23.97	23.39	24.52
Zadek	20.50	20.31	20.13	20.26	21.54
AVG	22.16	23.36	23.43	23.51	24.01

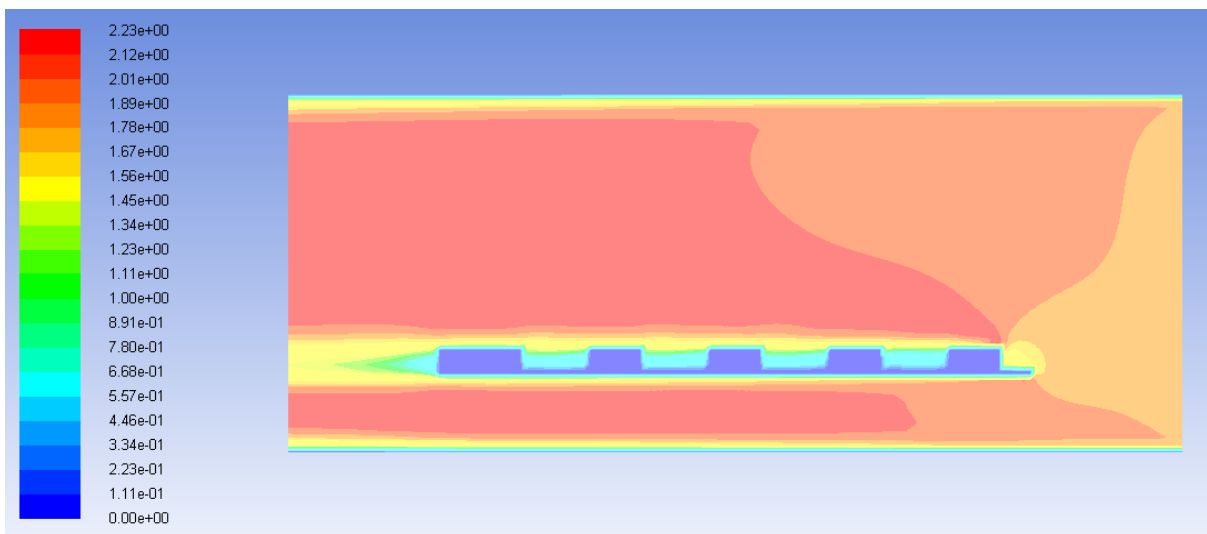
Tab. 11 – Výsledné součinitele přestupu tepla z programu ANSYS

AVG čela	23.39144715
AVG vršek	25.02282915
AVG Bokp	23.81491905
AVG Bokl	23.78652063
AVG Zadek	20.5100249
AVG ALL	23.28907088

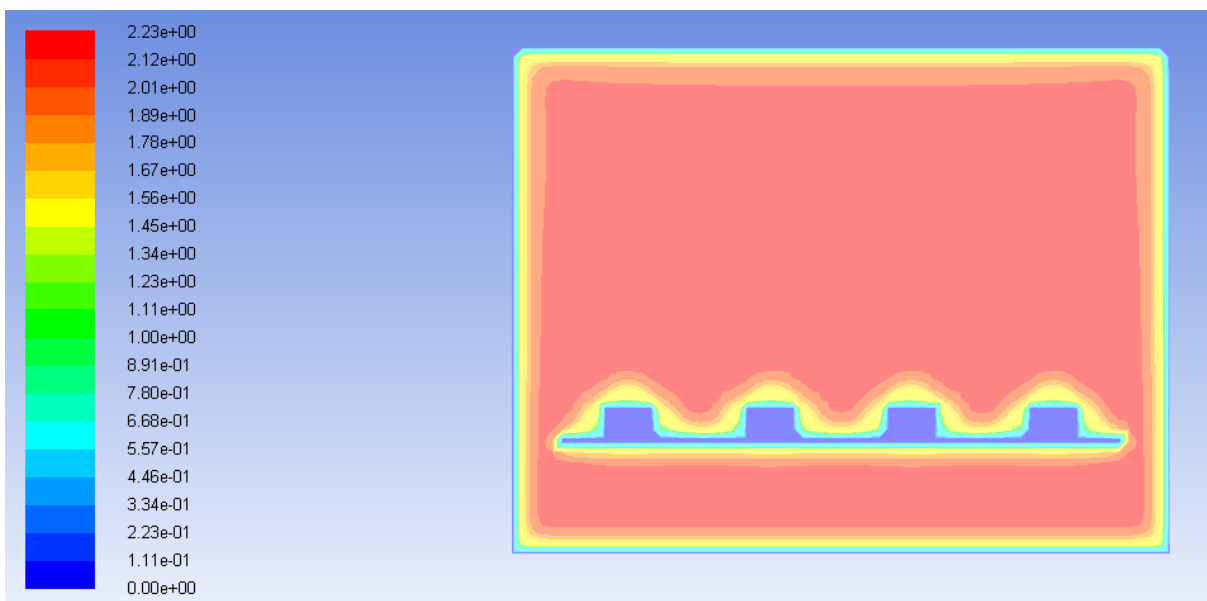
Tab. 12 – Průměrné hodnoty součinitele přestupu tepla z tab. 10

## 11.6 Dvojnásobné zvětšení vzdálenosti

Na obr. 40 a obr. 41 je možno vidět rychlostní pole simulované v programu ANSYS Fluent. V tab. 13 a tab. 14 jsou uvedeny velikosti součinitelů přestupu tepla  $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$  pro rychlost  $2 \frac{m}{s}$  s dvojnásobnými rozestupy oproti původnímu rozestavení.



Obr. 40 – rychlostní pole - pohled z boku



Obr. 41 – rychlostní pole – pohled z čela

Kostky rozestupy 2					
	kostka 1	kostka 5	kostka 9	kostka 13	kostka 17
Čelo	20.83	21.30	21.30	21.30	21.30
Vršek	24.42	24.42	24.42	24.42	24.42
Bokp	25.26	25.26	25.26	25.26	25.26
Bokl	24.29	24.29	24.29	24.29	24.29
Zadek	21.30	21.30	21.30	21.30	20.83
AVG	23.22	23.31	23.31	23.31	23.22
	kostka 2	kostka 6	kostka 10	kostka 14	kostka 18
Čelo	20.83	21.30	21.30	21.30	21.30
Vršek	24.42	24.42	24.42	24.42	24.42
Bokp	24.29	24.29	24.29	24.29	24.29
Bokl	24.29	24.29	24.29	24.29	24.29
Zadek	21.30	21.30	21.30	21.30	20.83
AVG	23.03	23.12	23.12	23.12	23.03
	kostka 3	kostka 7	kostka 11	kostka 15	kostka 19
Čelo	20.83	21.30	21.30	21.30	21.30
Vršek	24.42	24.42	24.42	24.42	24.42
Bokp	24.29	24.29	24.29	24.29	24.29
Bokl	24.29	24.29	24.29	24.29	24.29
Zadek	21.30	21.30	21.30	21.30	20.83
AVG	23.03	23.12	23.12	23.12	23.03
	kostka 4	kostka 8	kostka 12	kostka 16	kostka 20
Čelo	20.83	21.30	21.30	21.30	21.30
Vršek	24.42	24.42	24.42	24.42	24.42
Bokp	24.29	24.29	24.29	24.29	24.29
Bokl	25.26	25.26	25.26	25.26	24.29
Zadek	21.30	21.30	21.30	21.30	20.83
AVG	23.22	23.31	23.31	23.31	23.03

Tab. 13 – Výsledné součinitele přestupu tepla z programu ANSYS

AVG čela	21.2042252
AVG vršek	24.4233881
AVG Bokp	24.5304037
AVG Bokl	24.4818579
AVG Zadek	21.2041794
AVG ALL	23.1688108

Tab. 14 – Průměrné hodnoty součinitele přestupu tepla z tab. 3

## 11.7 Výpočet součinitele přestupu hmoty

Dle vztahu odvozeného v části 10.3 byl součinitel přestupu hmoty při rozestavení bez mezer následující:

$$\beta = \alpha_{ANSYS_0} \frac{D_{ef}}{\lambda_{80}} \left( \frac{\frac{\lambda_{80}}{\rho_{80} c_{p80}}}{D_{efW}} \right) = 15,36 \frac{6,55 \cdot 10^{-9}}{0,0293} \left( \frac{0,0293}{\frac{0,986 \cdot 1020}{3,4 \cdot 10^{-5}}} \right)^{\frac{1}{3}} = 3,26 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Mezery v původním rozestavení:

$$\beta = \alpha_{ANSYS_1} \frac{D_{ef}}{\lambda_{80}} \left( \frac{\frac{\lambda_{80}}{\rho_{80} c_{p80}}}{D_{efW}} \right) = 24,39 \frac{6,55 \cdot 10^{-9}}{0,0293} \left( \frac{0,0293}{\frac{0,986 \cdot 1020}{3,4 \cdot 10^{-5}}} \right)^{\frac{1}{3}} = 5,18 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Mezery 1,25x oproti základnímu rozestavení:

$$\beta = \alpha_{ANSYS_1} \frac{D_{ef}}{\lambda_{80}} \left( \frac{\frac{\lambda_{80}}{\rho_{80} c_{p80}}}{D_{efW}} \right) = 24,61 \frac{6,55 \cdot 10^{-9}}{0,0293} \left( \frac{0,0293}{\frac{0,986 \cdot 1020}{3,4 \cdot 10^{-5}}} \right)^{\frac{1}{3}} = 5,23 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Mezery 1,5x oproti základnímu rozestavení:

$$\beta = \alpha_{ANSYS_1} \frac{D_{ef}}{\lambda_{80}} \left( \frac{\frac{\lambda_{80}}{\rho_{80} c_{p80}}}{D_{efW}} \right) = 24,86 \frac{6,55 \cdot 10^{-9}}{0,0293} \left( \frac{0,0293}{\frac{0,986 \cdot 1020}{3,4 \cdot 10^{-5}}} \right)^{\frac{1}{3}} = 5,28 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Mezery 1,75x oproti základnímu rozestavení:

$$\beta = \alpha_{ANSYS_1} \frac{D_{ef}}{\lambda_{80}} \left( \frac{\frac{\lambda_{80}}{\rho_{80} c_{p80}}}{D_{efW}} \right) = 25,02 \frac{6,55 \cdot 10^{-9}}{0,0293} \left( \frac{0,0293}{\frac{0,986 \cdot 1020}{3,4 \cdot 10^{-5}}} \right)^{\frac{1}{3}} = 5,31 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Mezery 2x oproti základnímu rozestavení:

$$\beta = \alpha_{ANSYS_1} \frac{D_{ef}}{\lambda_{80}} \left( \frac{\frac{\lambda_{80}}{\rho_{80} c_{p80}}}{D_{efW}} \right) = 24,42 \frac{6,55 \cdot 10^{-9}}{0,0293} \left( \frac{0,0293}{\frac{0,986 \cdot 1020}{3,4 \cdot 10^{-5}}} \right)^{\frac{1}{3}} = 5,19 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

## 12. Porovnání výsledných hodnot

Pro vhodné navržení sušárny na sušení kostek cukru je podstatné získat co největší součinitel přestupu hmoty z kostek cukru do vzduchu, aby jejich sušení probíhalo co nejrychleji a byla tak urychlena sušící fáze, která, tak jako každá jiná fáze, ovlivňuje produkci celé výrobní linky. Cílem tedy bylo získat co největší součinitel přestupu hmoty a tím zjistit, která konfigurace bude nejvhodnější pro návrh sušárny.

Součinitel přestupu hmoty za pomoci korelačního vztahu pro nekonečnou desku:

$$\beta = 6,32 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Součinitel přestupu hmoty z původního rozmístění kostek s původní velikostí desky a kanálu je následující z programu Ansys FLUENT:

$$\beta = 7,16 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Součinitel přestupu hmoty při minimalizace mezer z programu Ansys FLUENT je takovýto :

$$\beta = 3,26 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Součinitel přestupu hmoty z původního rozmístění kostek ve zvětšeném kanálu z programu Ansys FLUENT:

$$\beta = 5,18 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Součinitel přestupu hmoty při zvětšení mezer 1,25x z programu Ansys FLUENT:

$$\beta = 5,23 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Součinitel přestupu hmoty při zvětšení mezer 1,5x z programu Ansys FLUENT:

$$\beta = 5,28 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Součinitel přestupu hmoty při zvětšení mezer 1,75x z programu Ansys FLUENT:

$$\beta = 5,31 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Součinitel přestupu hmoty při zvětšení mezer 2x z programu Ansys FLUENT:

$$\beta = 5,19 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Shrnutí:

Způsob výpočtu	Velikost součinitele přestupu hmoty [m/s]
Původní kanál	
Pomocí korelace	6.32E-06
Základní rozmístění	7.16E-06
Zvětšený kanál	
Bez mezer mezi kostkami	3.26E-06
Základní rozmístění	5.18E-06
1.25x větší	5.23E-06
1.5x větší	5.28E-06
1.75x větší	5.31E-06
2x větší	5.19E-06

Tab. 16 – porovnání výsledných hodnot

Porovnáním předchozích hodnot součinitele přestupu hmoty v rozšířeném kanále lze říci, že nejvhodnější rozložení kostek pro jejich sušení je při 1,75x zvětšených rozestupech oproti původnímu rozestavení (pokud by byly hodnoty porovnávány bez dalšího kontextu, jako například chyba měření, výpočtu a simulace), nejhorší pak, pokud mezi kostkami nebudou žádné mezery. Také lze říct, že velikost kanálu ovlivňuje součinitel přestupu hmoty. Z výsledků je zřejmé, že odpařování v menším (původním) kanále bylo rychlejší, než odpařování (při stejném rozestavení) v kanále větším. Dále lze říci, že vzdálenost mezi kostkami (pokud budou minimálně v původním rozestavení a maximálně s 2x většími mezerami oproti původnímu rozestavení) téměř neovlivňuje rychlost jejich sušení.

## 13. Návrh pásové konvektivní sušárny

Po získání potřebných parametrů z předchozí části diplomové práce je nyní možné navrhnout pásovou konvektivní sušárnu. Jedním ze základních předpokladů je, že čas sušení získaný experimentem bude stejný, jako pro průmyslové sušení při zachování stejných provozních parametrů.

Zadané hodnoty:

$M_1 = 60 \text{ kg/h}$  - množství materiálu vstupujícího do sušičky

$c_{FINAL}^m = 1,5 \%$  - finální vlhkost materiálu

$c_0^m = 5 \%$  - počáteční vlhkost materiálu

$\varphi_0 = 65 \%$  - relativní vlhkost vstupujícího vzduchu

$t_0 = 20^\circ\text{C}$  – původní teplota okolního vzduchu

$t_1 = 75^\circ\text{C}$  – teplota vzduchu po ohřátí

$t_2 = 50^\circ\text{C}$  – výstupní teplota vzduchu

### 13.1 Základní výpočty

Odečtené hodnoty z Mollierova diagramu:

Měrná vlhkost vzduchu:

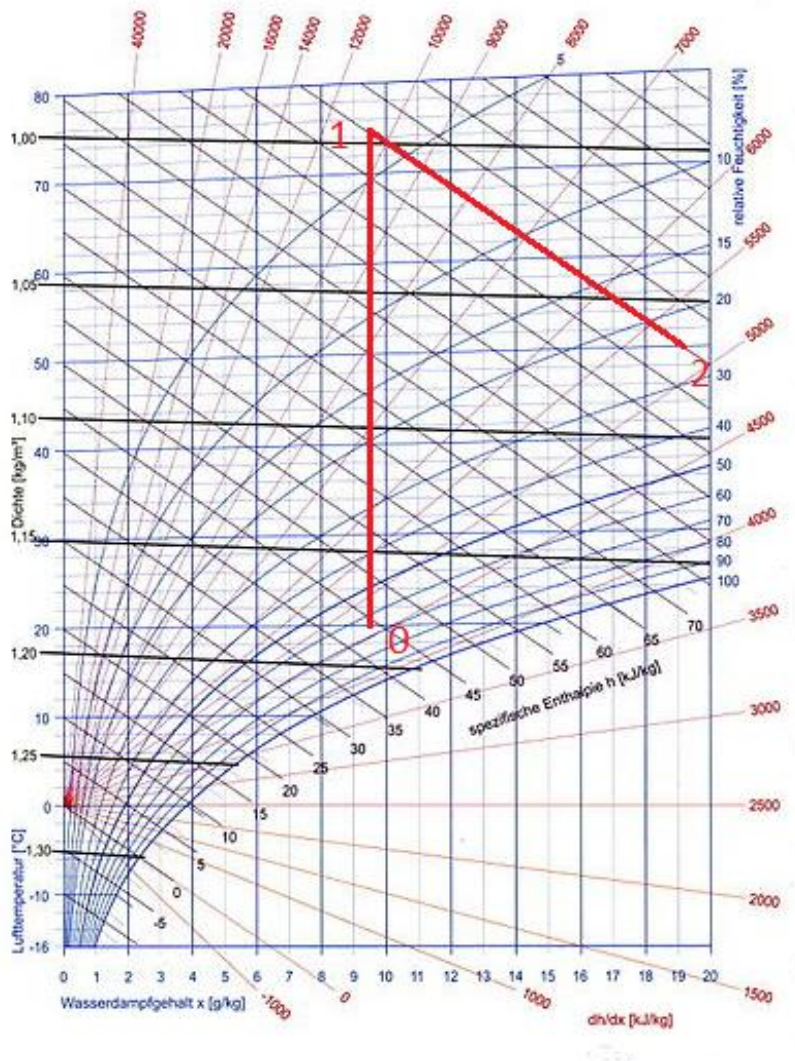
$$x_{A0} = x_{A1} = 0,0095 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}$$

$$x_{A2} = 0,0192 \text{ kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}$$

Entalpie:

$$h_{A0} = 44 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{A1} = 100 \text{ kJ/kg}$$



Obr. 41 - Mollierův diagram

Množství vysušeného materiálu:

$$M_2 = M_1 \left( \frac{1 - W_{A0}}{1 - W_{FINAL}} \right) = 60 \left( \frac{1 - 0,05}{1 - 0,015} \right) = 57,87 \frac{kg}{h} \quad (64)$$

Množství vysušené vody:

$$M_W = M_1 - M_2 = 60 - 57,87 = 2,13 \frac{kg}{h} \quad (65)$$

Potřebné množství sušícího vzduchu:

$$M_A = \frac{M_W}{x_{A2} - x_{A0}} = \frac{2,13}{0,0192 - 0,0095} = 219,59 \frac{kg}{h} = 0,060997 \frac{kg}{s} \quad (66)$$

Potřebné teplo pro vysušení materiálu:

$$Q_A = M_A \cdot (h_{A1} - h_{A0}) = 0,060997 \cdot (100 - 44) = 3,145 \text{ kW} \quad (67)$$



Předpokládáme, že sušící vzduch je ohříván parou o tlaku 200 kPa a teplotě 120°C. Měrné výparné teplo páry je tedy  $r_{TP} = 2201 \text{ kJ/kg}$ . Tepelné ztráty neuvažujeme.

Potřebné množství páry na ohřátí sušícího vzduchu:

$$M_S = \frac{Q_A}{r_{TP}} \cdot 3600 = \frac{3,145}{2201} \cdot 3600 = 5,144 \text{ kg/h}$$

## 13.2 Rozměrový návrh sušárny

V této části jsou vypočteny základní rozměry sušícího pásu. Výpočty vychází z hodnot z předchozí části. Pás je navrhován pro sušení kostek cukru. Hmotnost jedné kostky cukru je  $m = 6 \text{ g} = 0,006 \text{ kg}$ . Rozměry  $12 \times 18 \times 27 \text{ mm}$  (výška x šířka x délka). Rozestupy mezi kostkami jsou na bocích  $18 \text{ mm}$  a z čela  $27 \text{ mm}$ .

Plocha, kterou zabírá kostka včetně mezer, je tedy:

$$S_{cukr} = (0,018 + 0,018) \cdot (0,027 + 0,027) = 19,44 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (68)$$

Hmotnost sušeného cukru:

$$m_1 = 60 \text{ kg}$$

Teplota sušícího vzduchu:  $t_1 = 75^\circ\text{C}$

Rychlost sušícího vzduchu:  $v = 2 \text{ m/s}$

Doba sušení:  $\tau = 21\,600 \text{ sec} = 6 \text{ hodin}$

Rozměry sušícího pásu:

$$S_{pás} = \frac{m_1}{m} \cdot S_{cukr} = \frac{60}{0,006} \cdot 19,44 \cdot 10^{-4} = 19,44 \text{ m}^2 \doteq 20 \text{ m}^2 \quad (69)$$

Z plochy sušícího pásu byla odvozena jeho šířka  $P = 1 \text{ m}$  a délka  $Q = 20 \text{ m}$ .

Rychlost sušícího pásu, pro vysušení kostek je:

$$v = \frac{Q}{\tau} = \frac{20}{21\,600} = 9,259 \cdot 10^{-4} \text{ m/s} = 5,56 \text{ cm/min} \quad (70)$$

## 14. Závěr

V diplomové práci byl nejprve popsán proces sušení, s ukázkou výpočtu sušení ve vsádkové periodické konvektivní sušárně, následně byly popsány některé ze sušáren a metody sušení používané v potravinářském průmyslu. Poté byla popsána jedna z možností analytického řešení difuze vody z kostky cukru, která ovšem následně kvůli neodpovídajícím výsledkům nebyla použita. Dále je zde odvozena Chilton-Colbournova analogie, tedy analogie mezi přestupem tepla a hmoty, pomocí které byl v další části diplomové práce vypočten součinitel přestupu hmoty  $\beta$ . Následně je v diplomové práci používán program Ansys FLUENT, ve kterém byla provedena simulace sušení kostek a zjištění velikostí součinitelů přestupu tepla na různých částech kostek. Součinitel přestupu tepla byl také zjištěn pomocí korelace pro nekonečnou desku. Ovšem pro výpočet součinitele přestupu hmoty, bylo nejprve nutné zjistit difuzní koeficient. Ten byl zjištěn experimentálně. Experiment proběhl v laboratořích ČVUT ústavu Procesní a zpracovatelské techniky. Byla použita konvektivní periodická sušárna, se stejnými vnitřními rozměry jaké měl model v programu Ansys FLUENT. Za pomoci naměřených dat a matematického modelu, který je v diplomové práci odvozen, byl vypočten difuzní koeficient. Pomocí difuzního koeficientu bylo dále možné zjistit součinitel přestupu hmoty. Byly tedy spočteny součinitele přestupu hmoty z analytických výpočtů i z výpočtu z programu Ansys FLUENT. Dále byla sledována změna součinitele přestupu hmoty při změně vzdálenosti mezi kostkami za pomoci simulací v programu Ansys FLUENT. Z rozměrových důvodů byla šíře kanálu zvětšena. Byly provedeny následující rozložení (zvětšení oproti původnímu rozestavení): 0x; 1x; 1,25x; 1,5x; 1,75x; 2x. Rozložení 1x je stejné jako původní, avšak při změně šířky kanálu došlo i ke změně součinitele přestupu hmoty, bez změny rozestavení kostek. Výsledky byly porovnány a je z nich patrné, že změna vzdálenosti kostek v takovémto rozsahu nemá na součinitel přestupu hmoty výrazný vliv. Změna šířky kanálu ovšem součinitel přestupu hmoty ovlivnila. Poslední část diplomové práce se zabývá návrhem konvektivní pásové sušárny.

## Zdroje:

- [1] – Oldřich Holeček, studijní podklady pro předmět Laboratoř z chemického inženýrství VŠCHT, dostupné z: <http://uchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/labchi/S.pdf> 12.5.2018
- [2] – Hasal P., Schreiber I. Šnita D., et al.: Chemické inženýrství I. 2nd ed. Vysoká škola chemicko technologická v Praze, Praha 2007. ISBN 978-80-7080-002-7
- [3] – Marek Doležel, materiály pro předmět Chemie potravin VŠCHT Dostupné z: [https://web.vscht.cz/~dolezala/CHPC/1%20%C3%9Avod,%20voda\\_cvi%C4%8Den%C3%AD.pdf](https://web.vscht.cz/~dolezala/CHPC/1%20%C3%9Avod,%20voda_cvi%C4%8Den%C3%AD.pdf) 15.5.2018
- [4] – C.Akosman (2004) Determination of Drying Characteristics and Effective Diffusivity for Sugar Cubes, Chemical Engineering & Technology Volume 27, Issue 11, pages 1222–1226
- [5] – HORÁKOVÁ, Martina. *Vliv hygroskopických přísad na vodní aktivitu potravin*. Mendelova univerzita v Brně, 2013. Diplomová práce. Mendelova univerzita v Brně.
- [6] – *Wilton Pereira da Silva* (2013) Drying of Clay Slabs during the Falling Rate Period: Optimization and Simulation of the Process Using Diffusion Models Journal of Materials Science Research; Vol. 2, No. 2, ISSN 1927-0585
- [7] – Zdeněk Kroupa, Sušení biomasy [online]. Brno, 2017 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/100587>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [8] – Maisam D, Rasane P, Dey A, et al. Recent advances in conventional drying of foods. J. Food Technol Pres. 2017;1;25-34
- [9] – Judy Troftgruben, Drying food. <Http://www.aces.uiuc.edu> [online]. University of Illinois at Urbana-Champaign: Cooperative Extension Service, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2017 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: [http://www.aces.uiuc.edu/vista/html\\_pubs/DRYING/dryfood.html](http://www.aces.uiuc.edu/vista/html_pubs/DRYING/dryfood.html)
- [10] – ŠESTÁK, Jiří a František RIEGER. *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*. 1. ČVUT: ČVUT, 1993.

- [11] – King Abdulaziz University, studijní podklady pro předmět Chemical Engineering  
Dostupné z: <http://www.kau.edu.sa/Files/0001424/Subjects/note2%20333.pdf> 15.5.2018
- [12] – ANSYS, Inc., Ansys FLUENT 12.0 User's guide, dostupné z:  
[http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/main\\_pre.htm](http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/main_pre.htm) 15.5.2018
- [13] – AIDOSSULY, Magzhan. *Návrh sušárny kostkového cukru*. ČVUT Fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky, 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Jan Skočilas, Ph.D.
- [14] – Technický průvodce - Větrání a klimatizace, Prof. Ing. Jaroslav Chyský CSc., Prof. Ing. Karel Hemzal CSc. a kolektiv, Praha 1993
- [15] – PERRY, Robert H. a Don W. GREEN. *Perry's chemical engineers' handbook*. 8th ed. New York: McGraw-Hill, c2008. ISBN 0-07-142294-3.
- [16] – [EDITED BY] ARUN S. MUJUMDAR. *Handbook of industrial drying*. 2nd ed., rev. and expanded. New York: Dekker, 1995. ISBN 9780585321868.

## Příloha 1 – Kód v programu Python – analytická metoda

```
1  #!/usr/bin/env python
2  import numpy as np
3  import scipy.optimize
4  from multiprocessing import Pool
5  import matplotlib.pyplot as plt
6
7  # import data from file
8  data = []
9  with open("DATA_PYTHON.csv","r") as fid:
10     for line in fid:
11         data.append([float(col) for col in line.split(",")])
12 data = np.array(data[:776])
13
14 t_data = data[:,0]
15 Mstar_data = data[:,1]
16
17 def updateConstants(Def):
18     #Bi = 0.646*(kine_vis/Def)**0.333*(2*L/kine_vis)**0.5
19     Bi = 0.0365*(2*L/kine_vis)**0.8
20
21     return Bi
22
23 # define equation 2
24 def characteristic_eq(mu):
25     return mu*np.sin(mu) - Bi*np.cos(mu)
26
27 def characteristic_eq_root(i):
28     return scipy.optimize.brentq(characteristic_eq,i*np.pi,(i+1)*np.pi)
29
30 def computeMu(n):
31     n = int(n)
32     mu = np.zeros(n)
33     # parallelize root computation
34     for i in range(n):
35         mu[i] = characteristic_eq_root(i)
36     # with Pool() as pool:
37     #     for i,r in enumerate(pool.imap_unordered(characteristic_eq_root,range(n))):
38     #         mu[i] = r
39     return mu
40
41 # define computations for equation 1
42 def computeMstar(t,mu):
43     sc = np.sin(mu)*np.cos(mu)
44     el = (sc/(mu+sc))*np.exp(-(mu**2)*Def*t/(L**2))
45     return 2*np.sum(el)
46
47 # MAIN LOOP - here we compute Def that that fits best our data
48 plot = True
49 if plot:
50     # initialize plot
51     fig = plt.figure()
52     fig.show()
53     subplot = fig.add_subplot(1,1,1)
54     subplot.set_xlim([min(t_data),max(t_data)])
55     subplot.set_ylim([-0.01,1.01])
56     subplot.grid()
57     lines = [subplot.plot([],[],'-')[0] for _ in range(2)]
58     lines[0].set_data(t_data,Mstar_data)
```

```

59
60 kine_vis = 2.1e-5
61 L = 0.027
62 Def = 3.75e-8
63 step = 1e-8
64 last_mse = np.inf
65 while True:
66     # update constants for current Def
67     Bi = updateConstants(Def)
68     # compute first n roots of characteristic equation
69     mu = computeMu(5000)
70     # compute Mstar for every timepoint
71     Mstar = np.zeros(len(t_data))
72     for i,t in enumerate(t_data):
73         Mstar[i] = computeMstar(t,mu)
74     # compute difference from experimental data
75     diff = (Mstar-Mstar_data).reshape(-1,1)
76     mse = np.matmul(diff.T,diff)[0,0]
77     print(mse)
78     # stop if converged
79     if abs(mse-last_mse) < 1e-6:
80         break
81     # update Def
82     if mse>last_mse:
83         step /= -2
84     Def += step
85     last_mse = mse
86
87     if plot:
88         lines[1].set_data(t_data,Mstar)
89         fig.canvas.draw()
90
91 print(Def)
92
93 if plot: plt.show()
94

```

## Příloha 2 – Kód v programu Matlab – numerická metoda

Funkce výpočetního programu:

```
function [tspan,xmesh,u]=pdex11
    global m_data H L S rho delta_t Deff;
    m_data = xlsread('hmotnosti_odecet');
    H = 0.012;
    L = 0.027;
    S = H*L;
    rho = 1030;
    delta_t = 30;
    Deff =6.65e-9;

    mode = 0; % symmetry of the problem - slab
    xmesh = linspace(0,H,50);
    tspan = 0:delta_t:delta_t*(length(m_data)-2);

    sol = pdepe(mode,@pdefun,@icfun,@bcfun,xmesh,tspan);
    u = sol(:,:,1);
end
% -----
% components of the PDE
function [c,f,s] = pdefun(x,t,u,DuDx)
    global Deff L;
    c = 1;
    f = DuDx*Deff;
    s = 0;
end
% -----
% initial conditions
function u0 = icfun(x)
    u0 = 1;
end
% -----
% boundary conditions
function [pl,ql,pr,qr] = bcfun(xl,ul,xr,ur,t)
    global m_data S Deff rho L delta_t;
    i = floor(t/delta_t) + 1;
    %delta_m = m_data(i)+((m_data(i+1)-m_data(i))/delta_t)*mod(t,delta_t);
    delta_m = (m_data(i)+m_data(i+1))/2;
    m_dot = delta_m/delta_t;
    pl = 0;
    ql = 1;
    %pr = m_dot/(S*Deff*rho*1000*0.03428);
    pr = ur;
    qr = 0;
end
```

## Program:

```
clear all
close all

global m_data;
% m_data = xlsread('hmotnosti_odecet');
[t,x,u] = pdex11_predelane;
% surf(x,t,u);
% title('Numericke reseni');
% xlabel('vzdalenost y [m]');
% ylabel('Cas tau [s]');
% zlabel('Merna vlhkost [1]');

n = length(t);
d = length(x);
int = zeros(1,n);
for i = 1:n
    int_ = cumtrapz(x,u(i,:));
    int(i) = int_(d);
end
int = cumtrapz(u,2);
inttrans = fliplr(int);
g = linspace(0,776*30,n);

x = zeros(1,n);
for i = 1:n
    x(i) = inttrans(i)/inttrans(1);
%     scatter(g,x)

end
hold on

plot(g,x);

% figure(2);
hold on
data = xlsread('merna_vlhkost_s_vyhlazenim');
Mdot = data(1:775,end);
time = data(1:775,1);
hold on
plot(time*60,Mdot)
xlim([0 25000])
ylim([-0.1 1.05])
xlabel('Merna vlhkost [1]');
ylabel('Cas [s]');
title('Porovnani merenych a vypoctenych hodnot');

sums=0;
gf=775;

for i=1:gf
    sums=sums+(x(i)-Mdot(i)).^2
end
```