

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

VÝPOČTOVÁ ANALÝZA PROUDĚNÍ V BUBNOVÉ SUŠIČCE PRÁDLA

COMPUTATIONAL ANALYSIS OF FLUID FLOW IN A TUMBLE DRYER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MILOSLAV DOHNAL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ HÁJEK, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Miloslav Dohnal

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Procesní inženýrství (3909T003)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Výpočtová analýza proudění v bubnové sušičce prádla

v anglickém jazyce:

Computational analysis of fluid flow in a tumble dryer

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce bude zahrnovat provedení rešerše, transientní simulaci sušení a CFD model proudění sušícího vzduchu v bubnové sušičce. Smyslem práce je jednak vytvoření transientního modelu, který umožní zkoumat citlivost procesu sušení vzhledem k různým provozním parametrům, a také analýza proudění v sušičce s důrazem na zkratové proudění.

Cíle diplomové práce:

1. Vytvoření výpočtového CFD modelu bubnové sušičky prádla
2. Provedení simulace a analýza výsledků s důrazem na zkratové proudění kolem bubnu
3. Vytvoření transientního bilančního modelu přenosu tepla a látky v bubnu sušičky prádla
4. Provedení transientní simulace sušení
5. Rozbor vlivu parametrů simulačního modelu

Seznam odborné literatury:

Versteeg, H.K., and Malalasekera, W. "An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method", Longman Group Ltd., 1995

ANSYS FLUENT Documentation, Ansys Inc. (latest verison)

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jiří Hájek, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 25.11.2013

L.S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této práce je vytvořit výpočtový model radiální průmyslové bubnové sušičky prádla, provést výpočet a identifikovat množství vzduchu, které proteče dovnitř samotného bubnu. Výpočet je prováděn pomocí výpočetní dynamiky tekutin (CFD). Dále pak sestavit transienční bilanční model zmiňované sušičky prádla. Provést simulaci bilančního modelu a porovnat výsledky ze simulace s experimentálním měřením. Porovnáním experimentálních dat a simulace určit počet stupňů volnosti bilančního modelu a vyhodnotit jejich vliv na sestavený transienční model. Pro lepší porozumění sušicího procesu je zde sestaven systém diferenciálních rovnic popisujících vedení tepla a vlhkosti uvnitř sušeného materiálu na jednoduchém modelu. V části věnující se výpočtové analýze proudění tekutin je proveden rozbor stávající geometrie bubnu, která má zásadní vliv na proudění vzduchu dovnitř bubnu samotného. Následně je popsán způsob zjednodušení jeho komplexní geometrie vstupující do výpočetní dynamiky tekutin. Poté je provedena simulace proudění uvnitř bubnové sušičky prádla s využitím MRF a Sliding Mesh modelů. Nakonec je proveden rozbor získaných dat a je určeno průměrné množství vzduchu proudícího bubnem samotným. Naopak cílem práce není vytvořit další textovou pomůcku pro studenty zabývající se CFD tematikou.

KLÍČOVÉ SLOVA

CFD, ANSYS FLUENT, MRF, Sliding Mesh, Matlab, bubnová sušička, transienční model, sušicí proces

ABSTRACT

The aim of this work is to create a computational model of radial industrial tumble dryers, to calculate and identify the amount of air that flows through the inside of the drum itself. The calculation will be performed via computational fluid dynamics (CFD). Furthermore, compile transient balance model of mentioned dryers. Perform simulation balance model and compare the results of simulations with experimental measurements. By comparing the experimental data and simulation to determine the degrees of freedom of balance model and evaluate their impact on the assembled transient model. For a better understanding of the drying process, there is constructed a system of differential equations describing heat and moisture within the material being dried on a simple model. In the section devoted to the computational analysis of fluid flow is analyzed existing geometry of the drum, which has a major impact on the flow of air inside the drum itself. Following describes how to simplify its complex geometry entering the computational fluid dynamics. Then, there is carried out a simulation of fluid flow inside the tumble dryers using MRF and Sliding Mesh models. Finally, there is an analysis of the data obtained and determined the average amount of air flowing through the drum itself. On the contrary, the aim of the work is not to create another text tool for students engaged in CFD theme.

KEYWORDS

CFD, ANSYS FLUENT, MRF, Sliding Mesh, Matlab, tumble dryer, transient model, drying process

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE PRÁCE

DOHNAL, M. *Výpočtová analýza proudění v bubnové sušičce prádla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 94 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Hájek, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Já, Bc. Miloslav Dohnal, prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité prameny a literaturu.

V Brně, dne 6.2.2014

Miloslav Dohnal

PODĚKOVÁNÍ

Z celého svého srdce bych chtěl poděkovat svým rodičům, Evě Dohnalové a Jiřímu Dohnalovi za jejich nezměrnou podporu, jak morální, tak materiální během celého studia na FSI. Svému kamarádovi a konzultantovi Ing. Jánů Hrivňákovi za cenné rady. Dále pak své přítelkyni za trpělivost, kterou se mnou měla během vytváření této práce. V neposlední řadě svému dlouholetému vedoucímu doc. Ing. Jiřímu Hájkovi, Ph.D. za jeho ochotu a důvěru a panu Petru Opavskému z firmy Primus Laundry za poskytnutí podpůrných materiálů.

Obsah:

Obsah.....	1
1. Úvod.....	3
1.1. Úvod do výpočetní dynamiky tekutin (CFD).....	3
1.2. Charakteristika CFD.....	5
1.2.1. Řešení Navier-Stokesových rovnic (N-S rovnic).....	6
1.3. Sušení jako fyzikální proces.....	8
1.4. Sušící periody.....	9
2. Popis bubnové sušičky.....	10
2.1. Celkový pohled na proudění sušícího média.....	11
2.1. Parní ohřev.....	13
2.2. Buben.....	14
2.1. Elektrická ohřívací jednotka.....	15
3. Experimentální měření.....	16
3.1. Průběh experimentu.....	16
3.2. Měření fyzikálních veličin.....	17
3.2.1. Snímání teploty, relativní vlhkosti a tlaku.....	17
3.2.2. Snímání aktuální hmotnosti vsázky.....	21
3.3. Analýza experimentálních dat.....	22
3.3.1. Rozbor hmotnostních dat.....	22
3.3.2. Vliv reverzace chodu na relativní vlhkost.....	22
3.3.3. Vliv obsahu vlhkosti a hmotnosti vsázky na pohyb prádla.....	23
4. Tepelná a hmotnostní bilance bubnové sušičky.....	25
4.1. Přehled publikací zabývajících se sušením.....	25
4.1.1. Yadav, Moon – Proces sušení vláken v domácích sušičkách.....	25
4.1.2. J. Deans – Modelování domácí bubnové sušičky.....	26
4.2. Omezující parametry bilančního modelu.....	27
4.3. Transientní bilance.....	27
4.3.1. Přenos tepla.....	28
4.3.2. Přenos hmoty.....	30
4.4. Součinitel přestupu tepla a hmoty.....	31
4.5. Analýza výsledků simulace.....	36
4.5.1. Vliv součinitele přestupu tepla α	36
4.5.2. Vliv součinitele přestupu hmoty k	37
4.5.3. Statistický rozbor průběhu hmotnosti.....	38
5. Difuzní model.....	41

5.1.	Řídící rovnice a okrajové podmínky	41
5.2.	Geometrické a fyzikální předpoklady.....	43
5.3.	Numerická implementace	45
5.4.	Interpretace výsledků.....	50
5.4.1.	Rozložení teploty a vlhkosti v prádle.....	51
5.4.2.	Úbytek hmotnosti vsázky.....	53
6.	Analýza proudění uvnitř pracovního prostoru bubnové sušičky.....	54
6.1.	Virtuální geometrie bubnu.....	54
6.2.	Výpočetní oblast a okrajové podmínky	57
6.3.	Vývoj výpočetní sítě.....	60
6.4.	Globální nastavení řešiče.....	62
6.5.	Multiple Reference Frame (MRF) – ustálené řešení	64
6.6.	Sliding Mesh – neustálené řešení	68
7.	Závěr.....	72
8.	Použitá literatura	74
9.	Seznam použitých symbolů.....	76
10.	Seznam obrázků	78
11.	Seznam příloh.....	80

1. Úvod

V úvodní kapitole jsou uvedeny základy matematického modelování CFD (z anglického „Computational Fluid Dynamic“ – výpočetní dynamika tekutin) pomocí níž je provedena analýza proudění uvnitř bubnové sušičky prádla. Dále pak je zde uvedeno několik základních informací o sušení z fyzikální hlediska, neboť sušení je složitý proces, při kterém dochází k současnému sdílení tepla a hmoty mezi sušeným materiálem a sušícím médiem.

Druhá kapitola je věnována popisu studované velkokapacitní průmyslové sušičce s parním ohřevem. Cílem této kapitoly je poskytnout čtenáři přehled mechanismech, které se objevují během proudění sušícího média v samotné bubnové sušičce. Dále je zde uvedeno technické řešení ohřevu vzduchu a samotné nakládání během cyklu s médiem.

Ve třetí kapitole je popsán experiment, který proběhl v rámci této diplomové práce. Smyslem experimentu je získat pevné hodnoty fyzikálních veličin, které jsou následně použity jako počáteční a okrajové podmínky pro simulaci, která je provedena v kapitole čtvrté.

Postup realizace transientního bilančního modelu pro simulaci je uveden v kapitole číslo 4. Popis tvorby zahrnuje přehled dostupných publikací zabývajících se sušením. Během sbírání podkladů vhodných pro sestavení systému řídicích rovnic bilančního modelu nebyly nalezeny publikace, které popisují sušení v radiální sušičce prádla. Nejblíže podobné práce jsou věnovány sušením prádla v malých domácích axiálních bubnových sušičkách. Výsledný systém rovnic je aproximací modelů popisujících axiální sušičky s jistými omezeními.

Pátá kapitola je věnována vytvořenému čistě difuznímu modelu sušení prádla na značně zjednodušeném případě. Tato kapitola je vytvořena nad rámec diplomové práce a jejím smyslem je poukázat čtenáři vzájemnou korelaci mezi vedením tepla a distribucí vlhkosti uvnitř sušeného materiálu.

V poslední šesté kapitole je popsána tvorba výpočetní domény a sítě pro analýzu proudění uvnitř bubnové sušičky prádla. Je zde uveden postup aproximace reálné geometrie bubnu. Logické dělení oblasti, volba vhodných okrajových podmínek a v neposlední řadě je zde popsána volba výpočetních modelů, které jsou pro analýzu použity. Z výsledků avizovaných simulací proudění je popsáno proudění uvnitř bubnové sušičky a identifikováno průměrné množství vzduchu, které proteče bubnem v určitém časovém úseku.

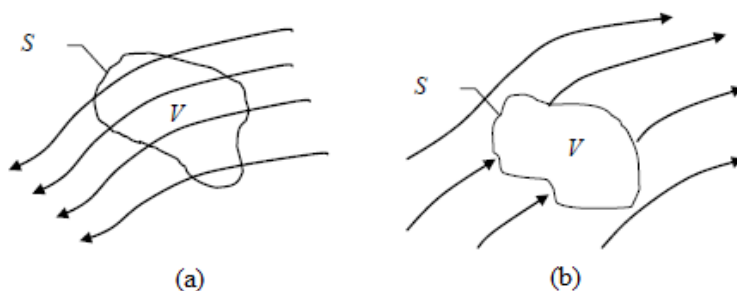
1.1. Úvod do výpočetní dynamiky tekutin (CFD)

Výpočtová dynamika tekutin, která vznikla jako samostatná vědecká disciplína poměrně nedávno, nabývá s vývojem výpočetní techniky daleko větší významnosti z technického hlediska a průmyslového uplatnění. V dobách před vznikem této disciplíny bylo možné pochopení a popsání dějů v teorii proudění tekutin možné ověřit pouze experimentálně. Je nutné podotknout, že tyto experimenty se bývají často velice finančně nákladné. Při těchto experimentech je nezbytné vytvořit zmenšený model, který odpovídá reálnému objektu v měřítku a pomocí podobnostních kritérií jej převést do měřítka 1:1 a použití adekvátních měřících přístrojů (viz. aerodynamické tunely a vývoj nových karosérií u monopostů F1). Na druhou stranu se často tyto dvě metody používají paralelně a získané údaje z CFD výpočtů se ověřují na modelech (v případech vozů F1, které jsou nejznámějším příkladem aplikace CFD a větrných tunelů). Někdy však není možné provést experiment a jedinou možností popisu chování systému je potom použití výhradně výpočetní dynamiky tekutin. [8]

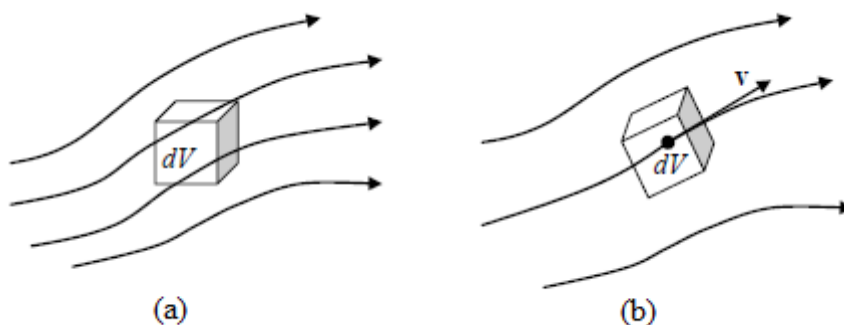
Řídící rovnice, které jsou základem pro CFD, byly odvozeny díky třem všeobecně platným fyzikálním zákonům a několika přístupům (v závislosti na povaze kontrolního objemu, které určují formu výsledné rovnice, která je buď integrální, nebo diferenciální, viz [8]).

Tabulka 1 Tabulka základních fyzikálních principů aplikovaných při odvození řídicích rovnic

Základní princip	Matematický popis	Slovní vyjádření
Zákon zachování hmoty	$dm = 0$	Hmota, která vstupuje do objemu, nikde nedisipuje a nepřibývá
Druhý Newtonův zákon	$\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a}$	Těleso, na které působí síla, se pohybuje se zrychlením, které je přímo úměrné působící síle a nepřímo úměrné hmotnosti tělesa
Zákon zachování energie	$dE = 0$	Celková energie izolovaného systému je neměnná, pouze může přecházet z jedné formy do druhé



Obrázek 1-1 Konečné objemy; (a) nepohyblivý, (b) pohyblivý (převzato z [8])

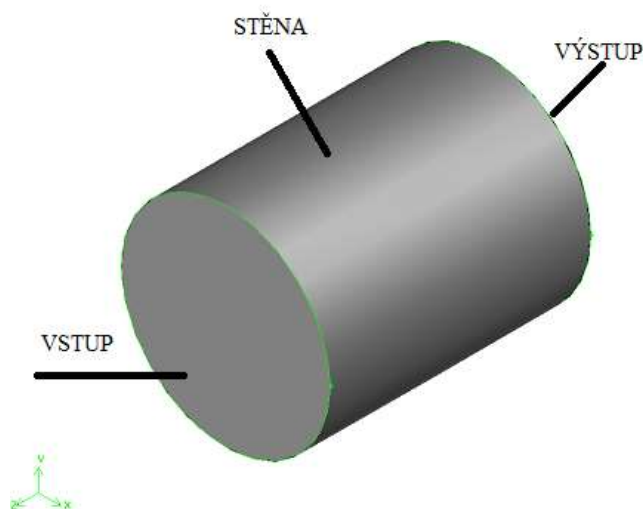


Obrázek 1-2 Infinitesimální objemy; (a) nepohyblivý, (b) pohyblivý (převzato z [8])

Díky těmto čtyřem schematicky znázorněným objemům lze odvodit čtyři různé formy řídicích rovnic v závislosti na tom, jaký kontrolní objem byl použit. Při použití konečného kontrolního objemu se jedná o tzv. integrální formu a při použití infinitesimálního objemu jde o tzv. diferenciální formu. V literaturách je také často uváděno, že použitím nepohyblivého, respektive pohyblivého objemu se jedná o *konzervativní* (Eulerovskou), resp. *nekonzervativní* (Lagrangeovskou) formu, které jsou mezi sebou vzájemně převeditelné. [8]

1.2. Charakteristika CFD

Předpokládejme, že objem na obrázku 3 je jednoduchý případ CFD simulace, kde nastává proudění tekutiny.



Obrázek 1-3 Jednoduchý příklad kontrolního objemu CFD simulace

V případě CFD simulace musíme vyřešit rychlostní (rovnice (1.1)) a tlakové pole uvnitř kontrolního problému.

$$\mathbf{v} = u \cdot \mathbf{i} + v \cdot \mathbf{j} + w \cdot \mathbf{k} \quad (1.1)$$

Přesněji řečeno, potřebujeme zjistit složky vektoru rychlost u , v , w a tlak p , které jsou funkcí souřadnic x , y , z a v případě neustáleného charakteru proudění i časové složky t , tudíž $u = f(x; y; z; t)$, $v = f(x; y; z; t)$, $w = f(x; y; z; t)$ a $p = f(x; y; z; t)$. Pro řešení těchto čtyř neznámých je nezbytné mít čtyři rovnice o čtyřech neznámých. [14]

Pro získání těchto čtyř rovnic využijeme zákony zachování uvedené výše v tabulce 1 na kontrolním objemu zobrazeném níže na obrázku 4 spolu s principem bilancování, který je:

$$\text{Změna uvnitř objemu} = \text{vstupní tok} - \text{výstupní tok}$$

Aplikací zákona zachování hmoty ($dm = 0$) získáme rovnici známou jako rovnice kontinuity v její diferenciální formě:

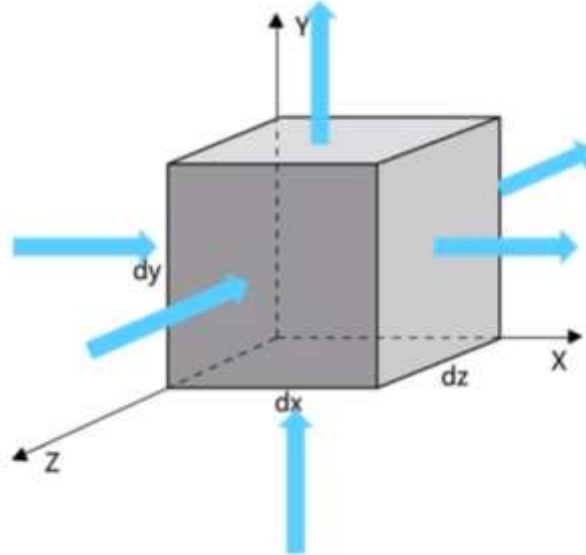
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \cdot v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \cdot w) = 0 \quad (1.2)$$

Ze zákona zachování hybnosti (aplikace druhého Newtonova zákona) získáme tři nezávislé rovnice pro každý směr souřadného systému, protože Newtonův zákon má charakter vektoru $\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a}$. Zde je uveden její generální tvar ve vektorovém zápisu pro zjednodušení zápisu.

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T} + \mathbf{f} \quad (1.3)$$

kde \mathbf{v} reprezentuje rychlostí pole, p tlakové pole, \mathbf{T} tenzor napětí způsobený třením kapaliny a \mathbf{f} znázorňuje hmotností síly působící na tekutinu.

Výše uvedené rovnice (1.2) a (1.3) dohromady tvoří známé Navier–Stokesovi rovnice. Řešením těchto rovnic lze najít všechny čtyři neznámé.



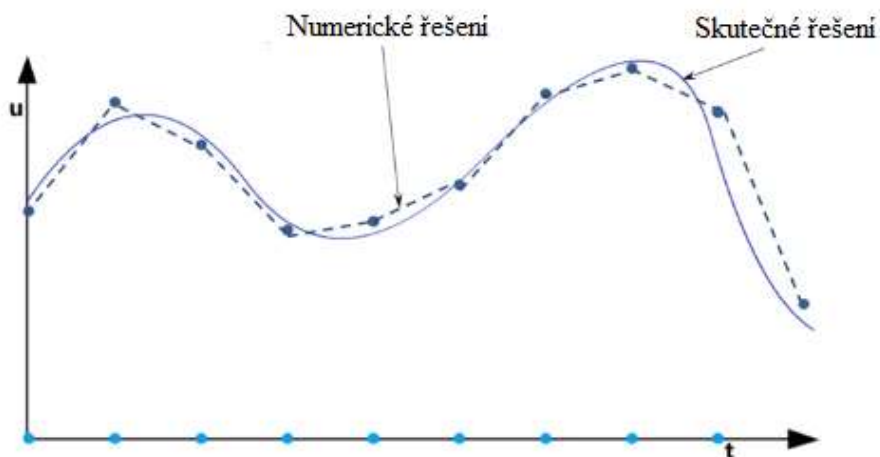
Obrázek 1-4 Kontrolní objem pro bilancování (převzato z [3])

1.2.1. Řešení Navier-Stokesových rovnic (N-S rovnic)

Analytické řešení N-S rovnic neexistuje, neboť se jedná o systém vysoce nelineárních parciálních diferenciálních rovnic druhého řádu (příklad analytického řešení je uveden v rovnici (1.4)). [14]

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\partial u}{\partial t} - 12u = 0 \rightarrow u(t) = C_1 e^{3t} + C_2 e^{-4t} \quad (1.4)$$

Jediný možný způsob, jak řešit tento systém rovnic je s využitím numerických metod, kdy skutečné řešení nahradíme řešením v diskretizovaných bodech (viz obrázek 1-5).



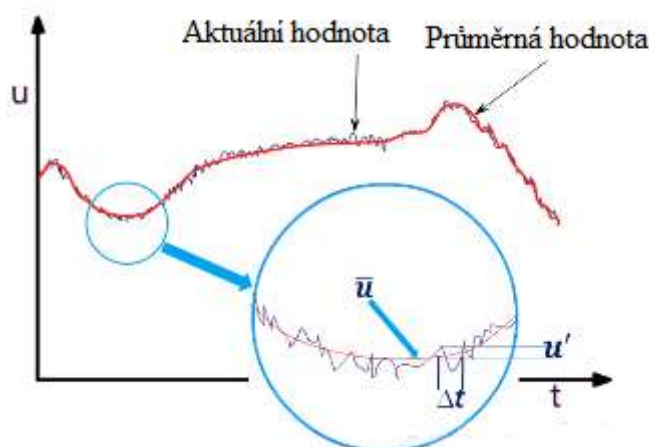
Obrázek 1-5 Princip numerického řešení (převzato z [14])

Pro prostorovou diskretizaci je možné využít několika matematických metod, jako jsou například FEM („Final Element Method“), FDM („Final Diferencial Method) a pro CFD simulace využívané FVM („Final Volume Method“). Pokud chce uživatel řešit systém rovnic přímo numericky, jedná se o tzv. DNS metodu („Direct Numerical Solution“). DNS metoda je vysoce přesná, ale pokud by uživatel chtěl řešit praktický problém touto metodou, tak i pro nejvýkonnější počítače této doby by výpočetní čas trval roky.

Z inženýrského hlediska není třeba znát přesné hodnoty řešení, ale vystačí pouze průměrné hodnoty, kdy aktuální hodnota řešení může být nahrazena průměrnou hodnotou a její flukтуаční složkou (viz rovnice (1.5) a (1.6)). [14]

$$u = \bar{u} + u' \quad (1.5)$$

$$\bar{u} = \frac{1}{\Delta t} \cdot \int_t^{t+\Delta t} u dt \quad (1.6)$$



Obrázek 1-6 Grafické vyjádření průměrování skutečné hodnoty (převzato z [14])

Po zprůměrování N-S rovnic hovoříme o tzv. RANS rovnicích („Reynolds Averaged Navier Stokes“) a výše uvedené rovnice (1.2) a (1.3) přejdou do tvaru: [14]

$$\bar{u}_{ij} = 0 \quad (1.7)$$

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-\bar{p} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u'_i u'_j} \right] \quad (1.8)$$

kde $i = 1,2,3$ a $\delta_{ij} = 0$ pro $i \neq j$ a $\delta_{ij} = 1$ pro $i = j$.

Poslední člen v hranaté závorce rovnice (1.8) reprezentuje tzv. Reynoldsovo napětí, které je dáno turbulencí tekutiny a pro určení tohoto členu existuje řada turbulentních modelů, například $k - \varepsilon$ nebo $k - \omega$.

1.3. Sušení jako fyzikální proces

Všeobecně je sušení komplikovaný děj, při kterém dochází ke sdílení hmoty a tepla. Rozdělením procesu na tyto dva děje (sdílení hmoty kontra sdílení tepla) lze zjednodušeně kvalifikovat a popsat procesy, ke kterým dochází během sušení materiálu.

V případě sdílení hmoty se jedná o difuzní proces, kdy vlhkost obsažená v materiálu přestupuje do sušícího vzduchu a je výhradně řízena druhým Fickovým zákonem, jehož znění je uveden vztahem (1.9).

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = D \nabla^2 \phi \quad (1.9)$$

Druhý Fickův zákon vyjadřuje změnu koncentrace dané látky v čase. Vztah (1.9) vyjadřuje předpoklad, že během sušícího procesu může být difúzní koeficient považován za konstantní. Pokud jej nelze považovat za konstantní, přejde vztah (1.9) do tvaru, jež je uveden ve vztahu (1.10).

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla(D \nabla \phi) \quad (1.10)$$

Sdílením tepla dochází výhradně konvekcí, která je řízena Newtonovým ochlazovacím zákonem (viz vztah (1.11))

$$\mathbf{q} = -\alpha \nabla T \quad (1.11)$$

Sušit lze nepřeberné množství materiálu. Od pálených cihel, keramiky přes potraviny až k lékům. Každý sušící proces je charakterizován tzv. sušící křivkou. Pro danou sušící křivku připadá pouze a jedině jeden dílčí sušící proces sušeného materiálu při daných počátečních a okrajových podmínkách.

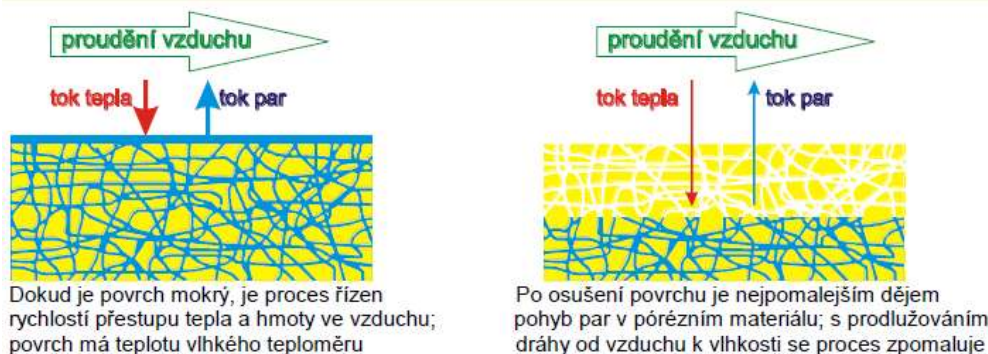
Nelze tedy jednoznačně kvalifikovat a konstatovat jaký bude průběh sušící křivky a celková doba trvání sušení. V drtivé většině je využíváno konvenčních sušáren, kdy je sušicím médiem vzduch díky jeho dostupnosti a „nízké“ vstupní ceně. Toto tvrzení vychází z bilancování sušárny, kdy vzduch vstupuje do pracovního prostoru sušárny s vlhkostí Y_{AIR1} a vystupuje s vlhkostí Y_{AIR2} a sušený materiál vstupuje s počáteční vlhkostí X_1 a vystupuje s finální vlhkostí X_2 . [19]

1.4. Sušící periody

Sušící křivku lze rozdělit do třech nezávislých period. První perioda nazývaná zahřívací („warm-up“) perioda, kdy dochází k postupnému zahřívání sušeného materiálu vlivem kondukce. Celkový přenos hmoty během této periody je nepatrný. V případě, že by vlhkost sušícího vzduchu byla vyšší než vlhkost sušeného materiálu, mohl by být sušící tok i záporný tzn., že vzduch by postupně předával svoji vlhkost materiálu. Tento děj by trval, dokud by nenastala fázová rovnováha mezi jejich vlhkostmi a teprve poté by docházelo k odtahování vlhkosti ze sušeného materiálu. Během této periody je pevný materiál zahříván, až povrchová teplota materiálu je v rovnováze se sušícím médiem (teplota suchého teploměru). Toto pokračuje, dokud není povrchová teplota v rovnováze s teplotou vlhkého teploměru sušícího média. Vstupní teplota sušícího média klesá o hodnotu latentního (výparného) tepla, které předává tekutině obsažené uvnitř materiálu. Tento přenos je nezbytný pro její fázovou změnu proto, aby mohlo dojít k jejímu odpařování. Zahřívací perioda pozvolna přechází do druhé fáze, které se říká konstantní („constant-rate“) perioda, při které je rychlost sušení konstantní. Během této periody je povrch pevného materiálu saturován tekutinou, protože volná vlhkost se odpařuje a na povrch materiálu je „vytahována“ takzvaná vázaná vlhkost umístěna uvnitř pórů materiálu. Rychlost sušení v této periodě sušení je řízena přestupem hmoty a tepla mezi sušeným materiálem a sušícím médiem a je na obsahu vlhkosti materiálu nezávislá. Intenzita toku hmoty jednotkovou plochou za jednotku času je v tomto období řízena rovnicí (1.12) [19].

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\alpha}{\lambda} (T_{air} - T_{cl}) = k \cdot (Y_{air}^0 - Y_{air}) \quad (1.12)$$

Závorka na pravé straně v rovnici (1.12) vyjadřuje hnací sílu sušení a součinitele α , λ a k jsou funkcí rychlosti proudění. Konstantní perioda trvá, dokud se nedosáhne tzv. kritické vlhkosti. Při dosažení právě této vlhkosti se začne sušící proces zpomalovat. Průběh sušení odehrávající se za kritickým obsahem vlhkosti se nazývá klesající („falling-rate“) perioda, kdy rychlost sušení postupně klesá, až dosáhne nuly. V tento moment nastává fázová rovnováha mezi vlhkostí obsažené v sušícím médiu a pevným materiálem. V některých literaturách se tento bod nazývá rovnovážný obsah vlhkosti. Tato klesající perioda může být ještě rozdělena na dvě „sub“ periody. V první z nich se vysušuje povrch materiálu a je uváděna jako „nesaturované sušení“. Ve druhé sub-periodě se fázové rozhraní sušení posouvá hlouběji do materiálu a rychlost sušení ještě výrazněji klesá. Během celé klesající periody dochází k postupnému uvolňování vázané vlhkosti uvnitř pórů. Vzhledem ke vzdalování fázového rozhraní od proudění sušícího média se stává vlivem nepohyblivých plynů uvnitř pórů kritickým dějem difúze. Taktéž klesá hodnota součinitele přestupu hmoty k . V případě, že póry nejsou stejně velké, je vlhkost nejprve odváděna z větších pórů a posléze z pórů menších. Zbylá neodvedená (rovnovážná) vlhkost je „uzamčena“ uvnitř mikro pórů ([19], [7]).



Obrázek 1-7 Grafické znázornění průběhu konstantní a klesající periody (převzato z [19])

2. Popis bubnové sušičky

Bubnové sušičky prádla poskytují rychlý způsob sušení mokrého prádla, hlavně pokud je limitován venkovní prostor pro sušení, či jeho podmínky celkově. Obecně přijatý je i fakt, že prádlo vysušené v bubnové sušičce se snáze žehlí. Výhody používání těchto zařízení jsou významná a jejich zastoupení v domácnostech se stále rozrůstá.

Malé domácí sušičky na prádlo jsou deriváty velkokapacitních průmyslových sušiček. Tyto menší jednotky mají omezenou dodávku elektrické energie pro ohřev vzduchu, a zároveň disponují menším objemem bubnu. Průmyslové sušičky mohou navíc mít i několik variant pro ohřev sušícího média podle potřeb zákazníka (parní nebo plynový ohřev). V případě této studie je práce věnována bubnové sušičce s parním ohřevem firmy Primus Laundry.



Obrázek 2-1 Vyobrazení průmyslové sušičky T24/T35 (převzato z [17])

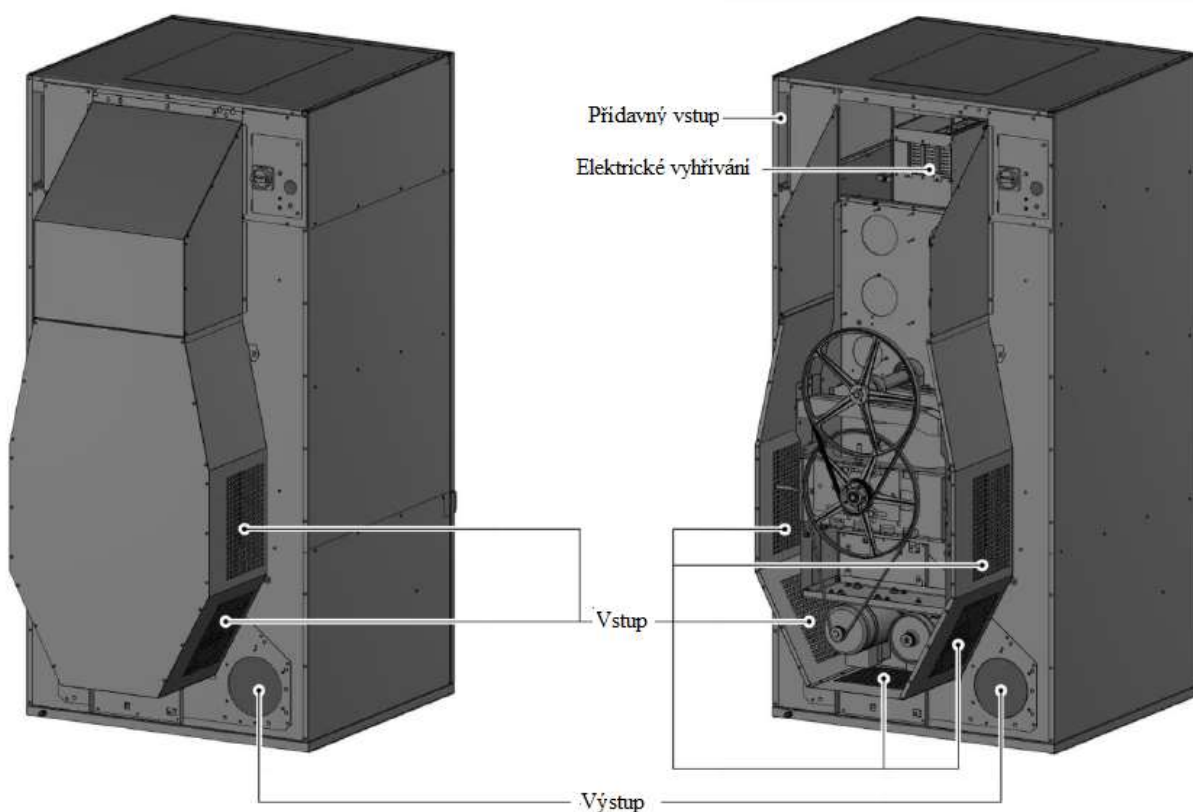
Na obrázku 2-1 a) (viz výše strana 10) je vyobrazena průmyslová vysoce kapacitní sušička prádla, která je umístěna v prostorách laboratoří ÚPEI. Pracovní jednotky typu T24, potažmo T35, disponují stejným průměrem bubnu a rozdíl v kapacitě sušičky je způsoben větší hloubkou zařízení (viz obrázek 2-1 b)) [4].

Tabulka 2 Technické specifikace bubnové sušičky T24 (převzato z [17])

Kapacita	24 kg	Odtah	200 mm
Objem bubnu	530 l	Rozměry stroje (V×Š×H)	1975×965×1270mm
Průměr bubnu	930 mm	Rozměry balení (V×Š×H)	2075×1040×1320mm
Počet bubnů	1	Objem balení	2,85 m ³
Počet dveří	1	Čistá hmotnost	275 kg
Průtok vzduchu	950	Hmotnost balení	300 kg
Průměr sušení	0,384 l/min	Parní ohřev	27 – 36,2 kW
Motor ventilátoru	0,55 kW	Tlak páry	3-6/7-10 bar
Motor pohonu	0,25 kW	Parní připojení	3/4

2.1. Celkový pohled na proudění sušícího média

Velkokapacitní bubnová sušička (která je analyzována v této práci) je vyobrazena výše na obrázku 9 a). Prádlo je sušeno uvnitř bubnu z nerezové ocele, kterým proudí sušící médium v radiálním směru. Tento buben je poháněn elektromotorem o výkonu 0,25 kW. Vzduch je přiváděn do pracovního prostoru pomocí ventilátoru, který je ovládán dalším elektromotorem o výkonu 0,55 kW. Tento ventilátor vytváří v pracovním prostoru podtlak, a díky tomuto podtlaku je ze zadní části přístroje nasáván okolní vzduch do vstupní komory (obrázek 2-2).



Obrázek 2-2 Zadní strana bubnové sušičky (převzato z [4])

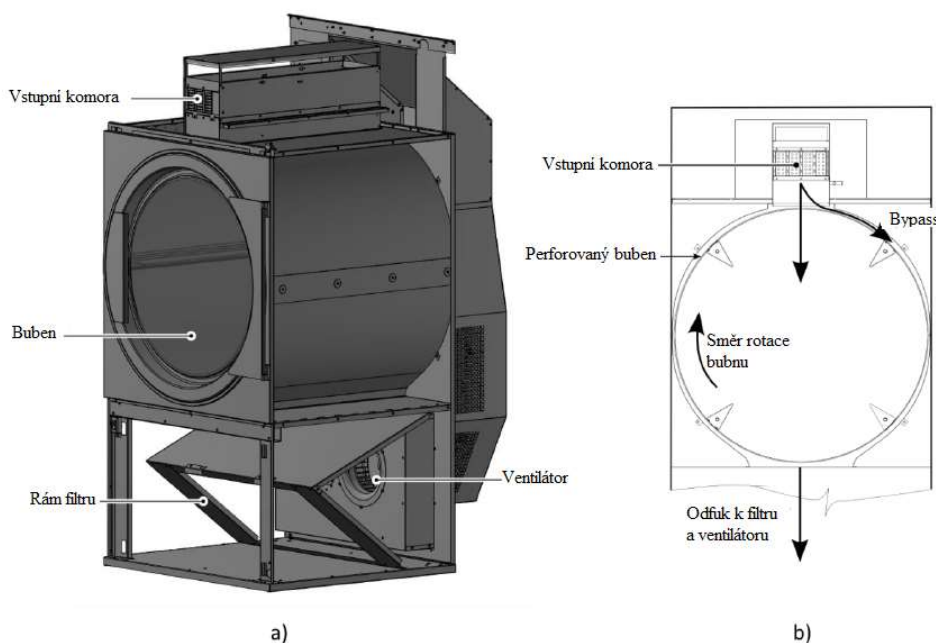
Nasátý vzduch stoupá vstupní komorou vzhůru, kde je nuceně změněn směr jeho toku a je přiveden k elektrické odporové ohřívací jednotce, kde je ohříván. Ohřívací jednotka nepracuje kontinuálně, ale pouze periodicky sepíná a ohřívá vzduch na požadovanou vstupní hodnotu. V případě verze s parním ohřevem je nasátý vzduch ohříván pomocí umístěného výměníku tepla. Pára je dopravována do výměníku, kde předá své teplo, ochladí se a je odváděna ve formě kondenzátu. Jeho zvýšená teplota zvětší gradient mezi prádlem a stěnou bubnu a urychlí tím přenos tepla do materiálu. Zároveň se sníží obsah vlhkosti v nasávaném vzduchu (snížení relativní vlhkosti), neboť ohřevem se zvýší saturační tlak par vzduchu, přičemž tlak par v nasávaném vzduchu se nemění.



Obrázek 2-3 *Přívod a odvod vzduchu*

Ohřátý vzduch po průchodu výměníkem tepla proudí směrem dolů do pracovního prostoru bubnové sušičky, kde je proudění sušícího média silně ovlivněno rotací samotného bubnu. Část média obteče buben bypassem a vůbec se nedostane do styku s prádlem, aby došlo k přenosu hmoty a tepla. Pouze předá část svého tepla bubnu a určitý díl tepla se projeví ve ztrátách stěnami jeho pracovního prostoru. Zbylá část sušícího média proteče perforací bubnu k prádlu, kde dochází k přenosu tepla a hmoty mezi prádlem a sušícím médiem. Přenesená vlhkost z povrchu prádla se projeví ve zvýšení obsahu vlhkosti v odchozivším médiu.

Po průtoku pracovním prostorem bubnové sušičky je vzduch veden k filtru, který zajišťuje separaci pevných částic ze vzduchu. Filtrovaný vzduch po průletu filtrem dosahuje ventilátoru, dokud je hnán do výfukových potrubí. Ventilátorová část spolu s filtrem jsou naznačeny níže na obrázku 2-4 a Obrázek 2-5.



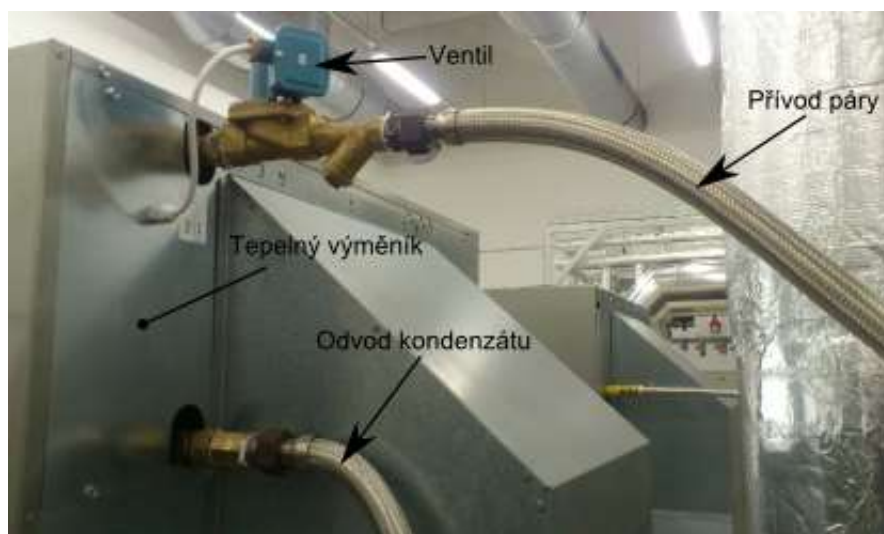
Obrázek 2-4 *Detail odtokové části sušičky (převzato z [4])*



Obrázek 2-5 Odtoková část a filtr pevných částic

2.1. Parní ohřev

V případě této studie je vzduch nepřímě ohříván pomocí průchodu parním výměníkem. Po zapnutí navoleného programu sušení řídicí jednotka otevře ventil umístěný na přívodní hadici, kterou je dopravována pára z rozvodu páry laboratoře. Tepelný výměník se napustí párou a po zaplnění tepelného výměníku párou se ventil zavře a zamezí dalšímu připouštění páry. Průchodem nasátého vzduchu výměníkem dochází k výměně tepla mezi párou a vzduchem. Vlivem odebrání tepla z páry v ní obsaženém je pára ochlazována a začne kondenzovat. Jakmile parní registr detekuje kritické množství kondenzátu, vyšle signál řídicí jednotce k znovuotevření připouštěcího ventilu páry. Proudící pára do výměníku nahrazuje zkondenzovanou páru a odvádí ji ven z výměníku. Zkondenzovaná pára opouští aparát prostřednictvím odvodňovací hadice do potrubí.



Obrázek 2-6 Přívod páry a odvod kondenzátu

2.2. Buben

Buben průmyslové sušičky T24, respektive T35 je vyroben z nerezové ocele. Průtok vzduchu je realizován perforací (obrázek 2-7 a)) pláště bubnu. Analyzovaná sušička zapadá do kategorie radiálních bubnových sušiček, je perforování převážně na plášti bubnu. Na čele je v porovnání s pláštěm zanedbatelný počet děr a pro zde prováděnou analýzu zanedbatelný. Na začátku kapitoly 2 bylo zmíněno, že rozdíl v kapacitě sušičky je dán rozdílnou hloubkou bubnu. Aparát T24 disponuje menším počtem děr než sušička T35, avšak zachovávají si stejný průměr.

Tabulka 3 Porovnání perforace bubnu

-	T24	T35
Objem bubnu [m³]	0,53	0,68
Průměr bubnu [mm]	930	930
Hloubka bubnu [mm]	780	1000
Průměr díry [mm]	6,5	6,5
Počet děr [-]	31680	40320



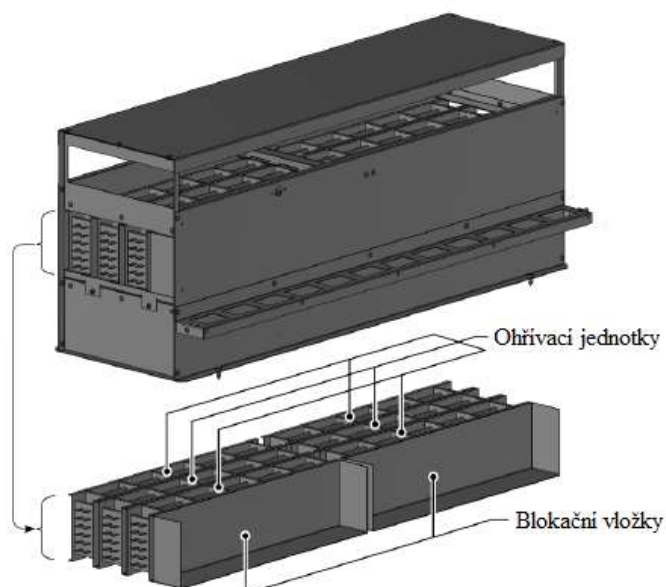
Obrázek 2-7 Perforace a žebrování bubnu

Aby nedocházelo k vysušování prádla dotýkajícího se stěny bubnu (v krajních mezích se může vsázka připéct na stěnu bubnu a poškodit se) je buben osazen perforovanými žebry. Vlivem rotace a osazení bubnu žebry dojde k převalování prádla. Přemísťování prádla zajistí částečnou výměnu prádla vyskytujícího se ve středu vsázky za prádlo, které se dotýká stěn. Nejen že tímto pohybem se částečně limituje možnost poškození látky, navíc distribuce vlhkosti obsažené v prádle je rovnoměrnější. V případě této studie je perforace žebor zanedbána.

Rotace bubnu je zajišťována dvojicí elektromotorů. Jeden z dvojice elektromotorů pohání buben samotný, přičemž druhý zajišťuje reverzaci chodu. Reverzace otáček omezuje zacuchávání prádla pro jednodušší manipulaci po dokončení sušícího cyklu.

2.1. Elektrická ohřívací jednotka

Frekventovaným způsobem ohřevu je elektrický způsob ohřívání. V této práci je ohřev zajištěn pomocí páry, ale je vhodné si uvést i další příklad ohřevu. Ohřívací jednotka se skládá z ohřívacích jednotek, které jsou složeny do bloků. Celkový elektrický výkon je dán součtem použitých vyhřívacích bloků (kazet) s nominální hodnotou 4,5 a 6 kW. [4]



Obrázek 2-8 Ohřívací jednotka (převzato z [4])

Kazety jsou složeny ze tří částí – podpor drátů, základní desky a samotných ohřívacích drátů. Elektrické dráty jsou vinutě taženy napříč kazetami (viz obrázek 2-6 b) níže). Kompletní kazeta je vyobrazena na obrázku 2-6 a). Ohřívací jednotka může být osazena až osmi kazetami pro maximální tepelný výkon. V případě, kdy kapacita kazet v jednotce není plně využita, je namísto kazety vložena přepážka. Vložená přepážka má zabraňovat proudícímu médiu obtéct vyhřívací dráty. [4] Kdyby se tak stalo, tak médium proteče ohřívací jednotkou bez ohřátí a nedocházelo by k homogennímu ohřevu. Zároveň by došlo ke snížení hnací síly sušícího procesu. Pro zabránění přehřátí bubnové sušičky je pod ohřívací jednotku nainstalována termočlánková sonda. Pokud teplota překročí teplotní limit stanovený výrobcem, sonda jej zaznamená a odstaví jednotku od elektrického proudu.

3. Experimentální měření

Během tvorby této diplomové práce bylo provedeno experimentální měření sušícího procesu bavlněných froté ručníků. Cílem experimentu bylo zjistit potřebný čas k vysušení dané hmotnosti vsázky (prádla), respektive hmotnost vlhkosti v prádle obsaženém, aby bylo možné ověřit analytický model, který je podrobněji popsán níže v kapitole 4.

Test bubnové sušičky proběhl v laboratoři pro energeticky náročné procesy v areálu Ústavu procesního a ekologického inženýrství. Experiment byl proveden ve spolupráci s Gutovským, který se této tématice věnuje ve své diplomové práci [6]. Proto zde bude použit pouze výňatek získaných informací relevantních pro tuto diplomovou práci.

3.1. Průběh experimentu

Před zahájením samotného experimentu bylo nejprve nutné roztrždit a zvážit na plošinové váze vsázku. Jako materiál vsázky byly zvoleny froté ručníky. Během roztržďování 105 kusů použité textilie byl proveden test jejich gramáže pro následné určení efektivní plochy přestupu tepla a hmoty mezi prádlem a sušícím médiem. Pomocí statistických metod byl určen medián hmotnosti froté materiálu na 465 g. Parametry použitého materiálu jsou shrnuty v Tabulka 4.

Tabulka 4 Parametry použitého materiálu

Gramáž [kg/m ²]	< 0,5 ; 0,55 >
Materiál	Bavlna, froté
Provedení, barva	Ručník, bílá
Rozměry š x v [m]	0,65 x 1,3
cp [J/kg/K]	1,21
ρ [kg/m ³]	1520
λ [W/m/K]	0,03

Vybrané ručníky byly následně naskládány do pojízdného vozíku a jejich suchá hmotnost převážena na plošinové váze. Suchá hmotnost vsázky byla určena na 15 kg \pm 0,05 kg. Specifikace použité plošinové váhy jsou uvedeny v Tabulka 5.

Tabulka 5 Specifikace plošinové váhy (převzato z [18])

Kapacita vážení [kg]	200	Materiál nájezdu	Nerezová ocel
Přesnost vážení [kg]	0,05	Nulování:	Ruční, automatické
Rozměry vážící plochy [mm]	900x900	Komunikační rozhraní	0/4 ÷ 20 mA nebo 0 ÷ 10 V
Výška vážící plochy nad úrovní podlahy [mm]	50		RS 232 nebo USB
Počet nájezdů [-]	2	Napájení	230 V, 50 Hz
Délka nájezdu [mm]	400	Provozní teplota [°C]	5 ÷ 40



Obrázek 3-1 Plošinová váha s nájezdem

Následně byla celá vsázka vložena do pračky, kde se cca 20 minut prala a na závěr odstředila. Účelem tohoto kroku bylo nechat vlákna nasáknout vodu (vlhkost). Po ukončení odstředovacího cyklu pračky se určila počáteční hmotnost vsázky pro sušicí cyklus, který následoval přímo po vytažení z pračky. Opětovným převážením na plošinové váze byla její mokrá hmotnost stanovena na $22,3 \text{ kg} \pm 0,05 \text{ kg}$. Hmotnost nasáknuté vlhkosti lze získat z rovnice (3.1).

$$m_w = m_{wet} - m_{dry} \quad (3.1)$$

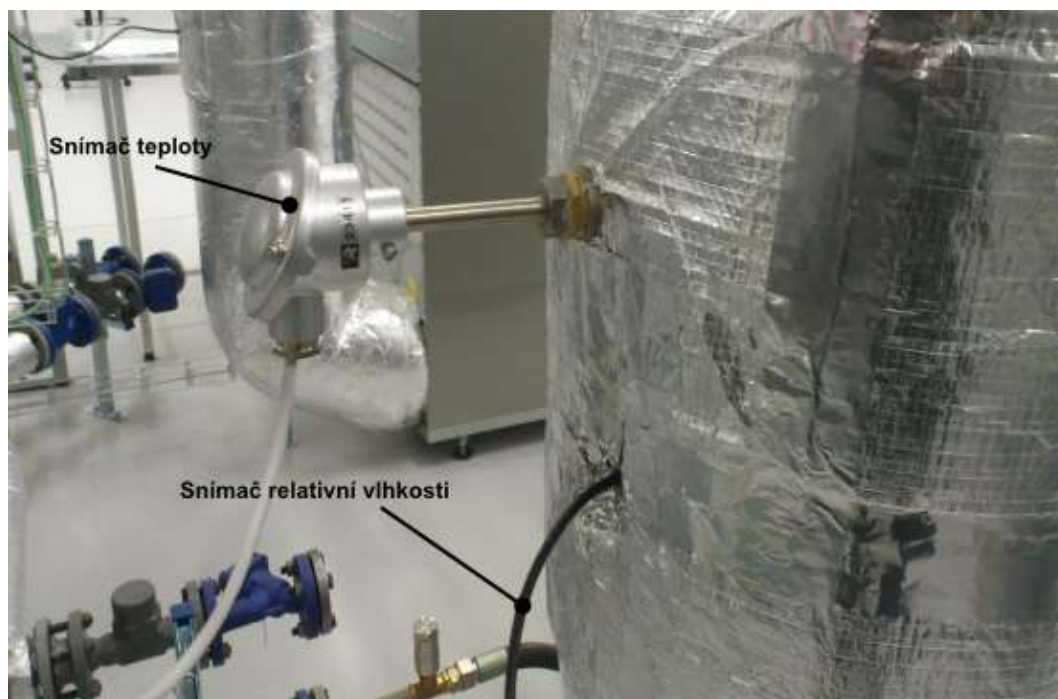
V poslední části experimentu bylo mokré prádlo vloženo do sušičky, kde se sušilo na koncovou hmotnost, která činila po převážení $18 \text{ kg} \pm 0,05 \text{ kg}$.

3.2. Měření fyzikálních veličin

Během sušicího procesu je na stroj připojeno několik měřidel pro snímání fyzikálních parametrů, jako jsou výstupní teplota sušicího média, relativní vlhkost a aktuální hmotnost vsázky. Všechny níže uvedené snímače pracují se vzorkovací frekvencí 1 s.

3.2.1. Snímání teploty, relativní vlhkosti a tlaku

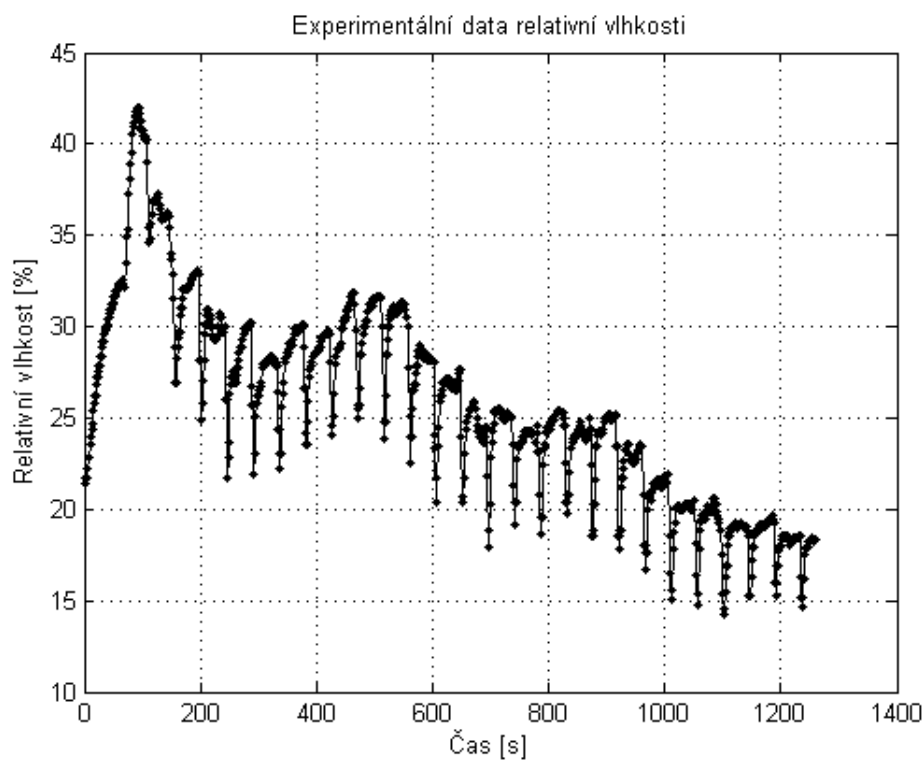
Na ventilátor, umístěný v odtahové části aparátu za filtrem pevných částic je napojeno odvodní potrubí, které odvádí vlhký vzduch pryč ze stroje. Na toto odvodní potrubí je připevněna sonda pro měření relativní vlhkosti vzduchu, která určuje dobu trvání sušicího cyklu. Před započítáním sušení byl zaveden předpoklad, že prádlo je dostatečně vysušeno při hodnotě 5 % relativní vlhkosti. Při dosažení této hodnoty se sušicí cyklus zastaví a po něm následuje „chladící“ perioda, která trvá pět minut. Během této periody stále dochází k odpařování vlhkosti v prádle. Účelem této periody je nechat zchladnout prádlo samotné, a tím zamezit připékání prádla na stěnu bubny, tzn. poškození sušeného materiálu vlivem vyhřáté stěny. Technické specifikace této sondy jsou uvedeny níže v Tabulka 6.



Obrázek 3-2 Snímání výstupní teploty a relativní vlhkosti vzduchu

Tabulka 6 Technické specifikace sondy relativní vlhkosti (převzato z [18])

Měření relativní vlhkosti při teplotách do 180 °C	
Přesnost – maximální chyba	
Při 20 °C	1 % r.v. – pro rozsah 10 ÷ 90 % r.v., jinak 1,8 % r.v.
Při 40 °C	$(1,1 + 0,008 \cdot \text{naměřená hodnota r.v.})$ % r.v.
Při 180 °C	$(1,6 + 0,015 \cdot \text{naměřená hodnota r.v.})$ % r.v.



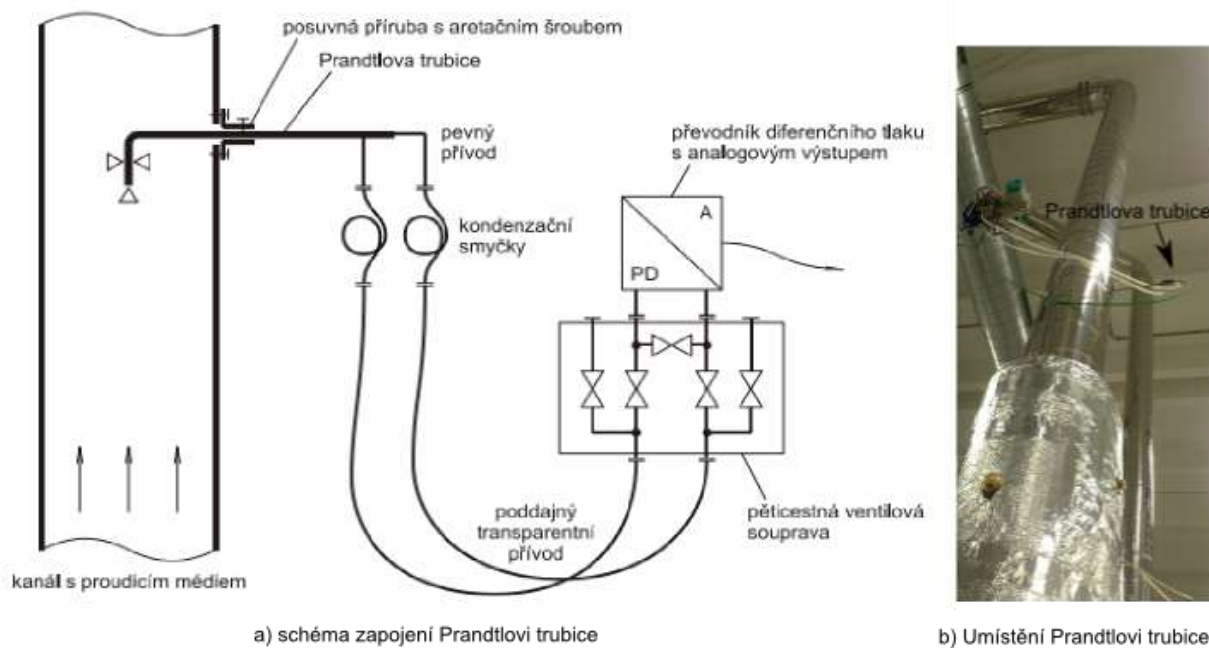
Obrázek 3-3 Experimentální data relativní vlhkosti

Na odtokové potrubí je umístěna sestava pro měření rychlosti proudění. V této sestavě je integrována Prandtlova trubice, která je opatřena posuvnou přírubou pro měření ve všech částech potrubí až do DN300 a teplot 300 °C s chybou maximálně 0,25 %. Součástí této sestavy jsou i kondenzační smyčky, pěticestné ventilové hlavy a převodník diferenčního tlaku. Tato trubice v případě provedeného experimentu posloužila pro snímání průběhu diferenčního tlaku po dobu trvání sušení. Špičky naměřených hodnot diferenčního tlaku se pohybují v rozmezí 1 %, z čehož lze usuzovat konstantní hodnotu průtoku sušícího média. Naměřené hodnoty jsou uvedeny na obrázku 3-5.

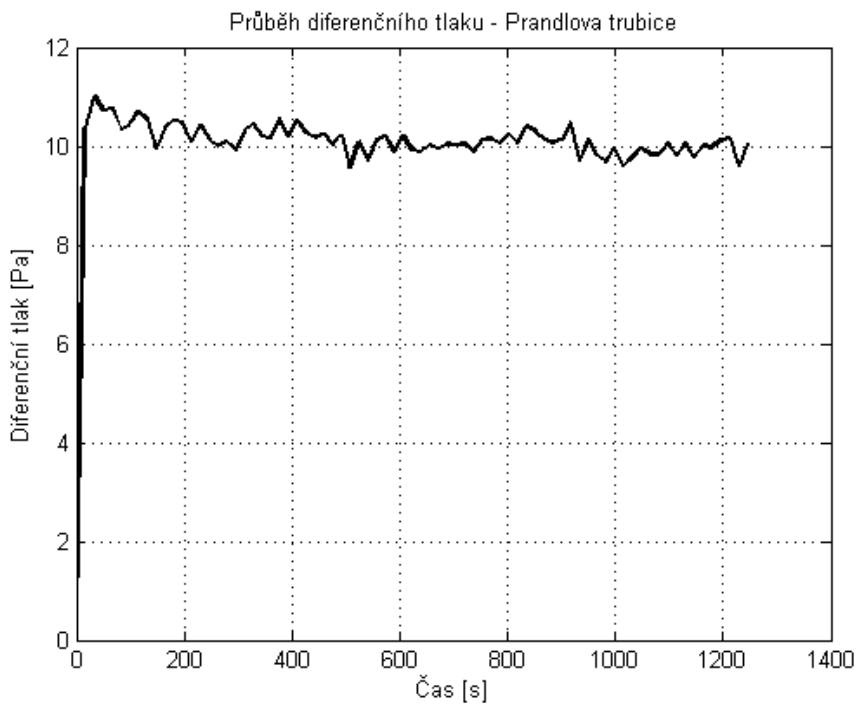
Teplota sušícího média je na odtahu měřena prostorovým čidlem teploty. Schéma zapojení sestavy pro měření tlaku a technické specifikace čidla pro měření teploty je uvedeno níže.

Tabulka 7 Technické specifikace prostorového čidla teploty (převzato z [18])

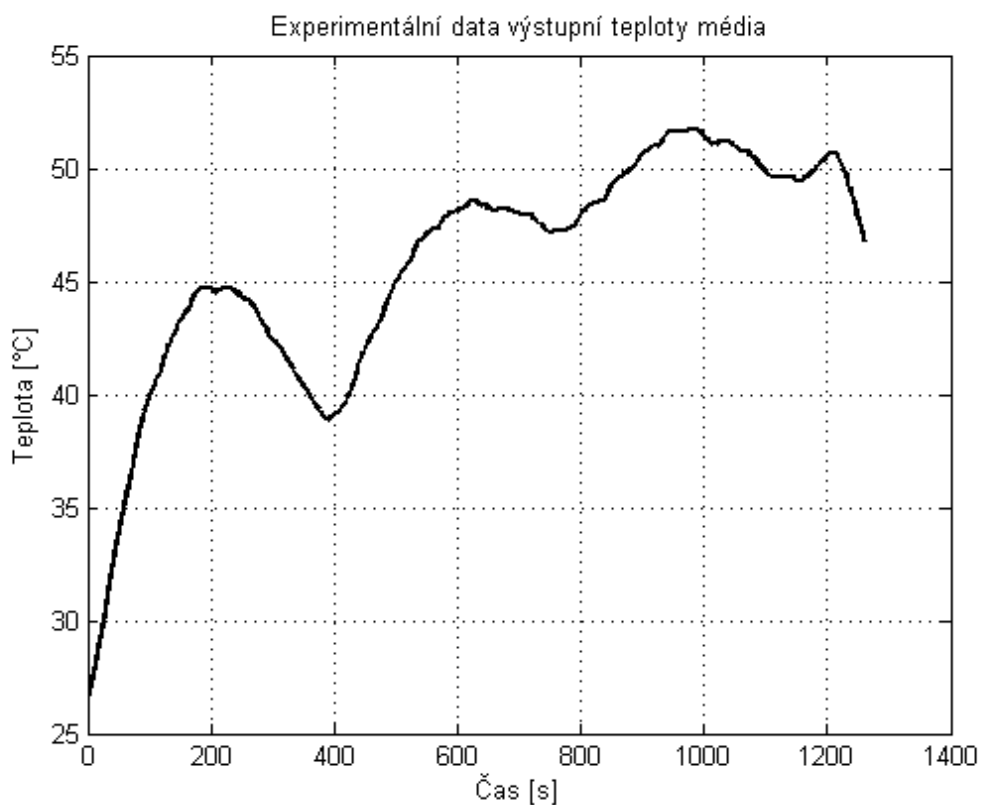
Rozsah teplot [°C]	-30 ÷ 80
Výstup [mA]	4 – 20
Přesnost měření [°C]	± 0,4



Obrázek 3-4 Schéma zapojení a umístění Prandtlovi trubice (převzato z [18])



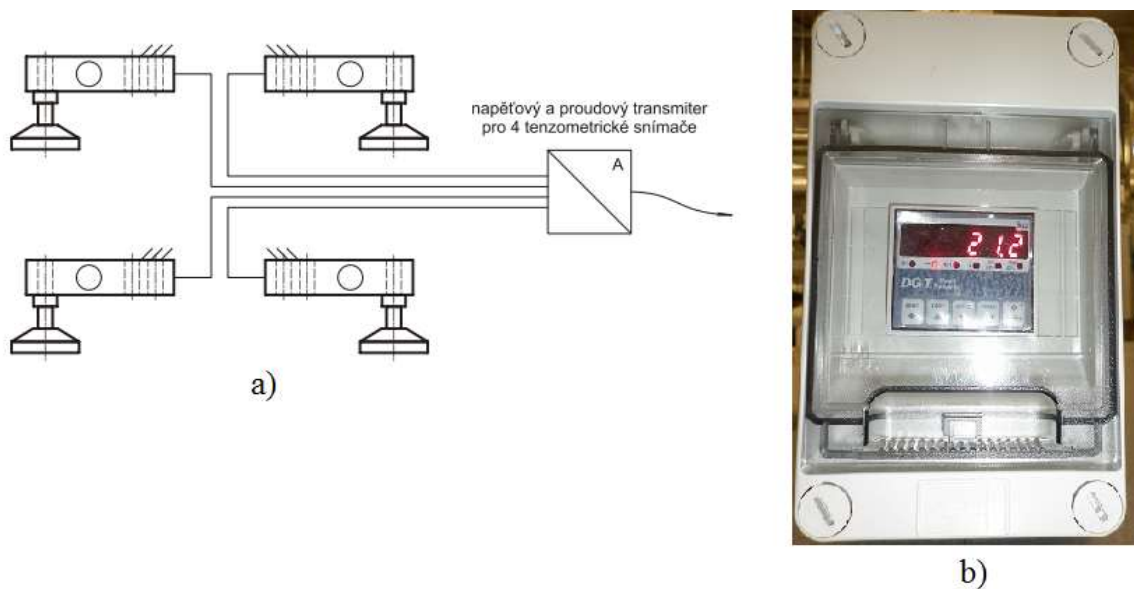
Obrázek 3-5 Průběh diferenčního tlaku



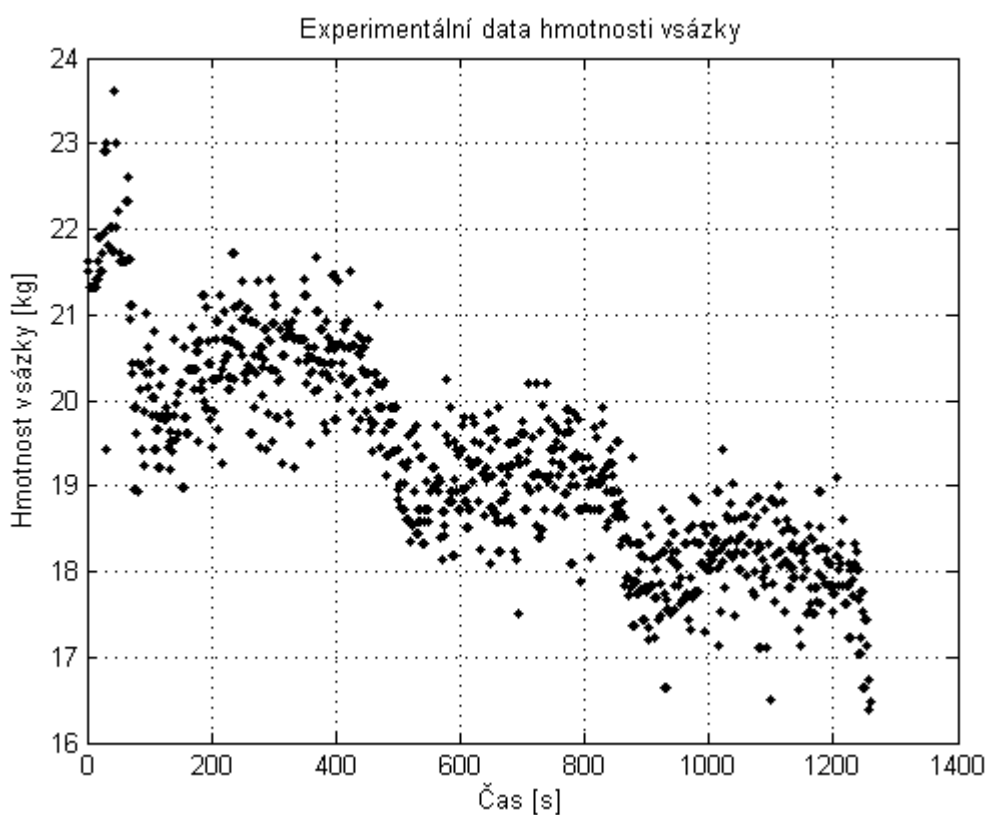
Obrázek 3-6 Průběh výstupní teploty sušícího média

3.2.2. Snímání aktuální hmotnosti vsázky

Nejlépeším způsobem jak měřit množství vody obsažené v prádle, a tím i její úbytek v čase, je měřit aktuální hodnotu hmotnosti vsázky. Z tohoto důvodu je aparát na stojinách osazen tenzometrickými snímači, které zaznamenávají aktuální hodnotu hmotnosti vsázky.



Obrázek 3-7 a) Schéma zapojení tenzometrů (převzato z [18]); b) Výstupní panel



Obrázek 3-8 Experimentální data hmotnosti vsázky

3.3. Analýza experimentálních dat

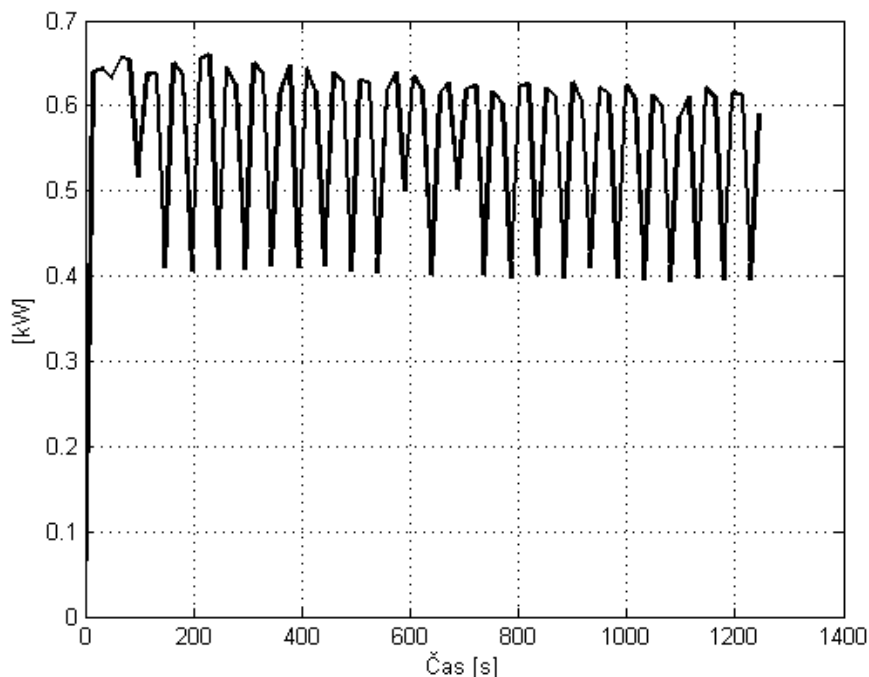
Distribuce vlhkosti a teploty v radiálním, respektive axiálním směru jak vzduchu tak prádla závisí na druhu sušeného materiálu, vlhkosti a ložné hustoty. Typ materiálu (pórozita) určuje šíření vlhkosti z jeho pórů na povrch, kde následně dochází k jejímu odvodu. Obsah vlhkosti „řídí“ pohyb prádla uvnitř bubny. Když je obsah vlhkosti vyšší, prádlo vytváří kohesivní (soudržné) celky. V těchto celcích je žebry přemísťováno od stěny rotujícího bubnu na povrch vloženého prádla. Ložná hustota ovlivňuje pohyb prádla a schopnost bubnu přemísťovat prádlo napříč proudem vzduchu. Deans ve své práci dospěl k podobným závěrům. [5]

3.3.1. Rozbor hmotnostních dat

Naměřené hodnoty během experimentu poukazují na to, že sušení uvnitř bubny je nehomogenní. Z pohledu na Obrázek 3-8, na kterém je zobrazena evoluce hmotnosti vsázky v čase, lze pozorovat „kaskádovitý“ průběh dat. Během jedné kaskády dochází k nárůstu hodnot hmotnosti. Tento nárůst je způsoben přiváděním páry do výměníku tepla pro ohřev sušícího média. Porovnáním průběhu hmotnosti (Obrázek 3-8) a výstupní teploty vzduchu (Obrázek 3-6) lze spatřit korelaci mezi těmito dvěma veličinami. Po nasátí páry do výměníku dojde ke sdílení tepla, což vede k jejímu ochlazení. Ochlazení páry se projeví v poklesu výstupní teploty média. Schodkovitý přechod mezi dílčími kaskádami znamená odvod zkondenzované páry, respektive výměnu ochlazené páry za novou. Přisátí nové páry se projeví v opětovném nárůstu hmotnosti o hodnotu rovnající se právě nasáté páře a také zvýšením výstupní teploty vzduchu. Mírná oscilace dat je způsobena převalováním prádla vlivem rotace bubny.

3.3.2. Vliv reverzace chodu na relativní vlhkost

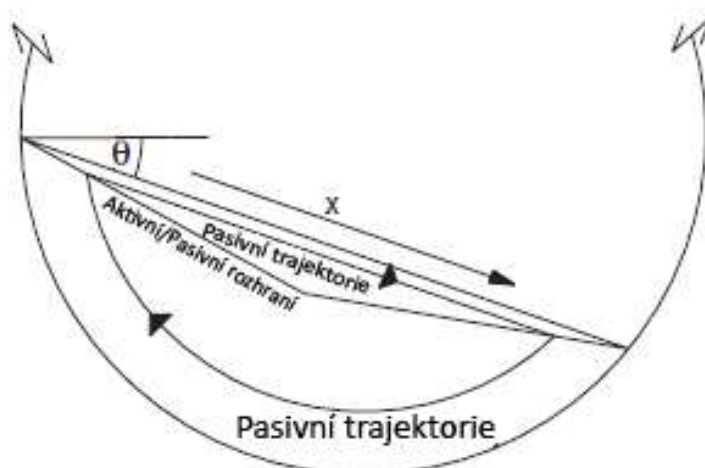
Při pohledu na Obrázek 3-3 jsou vidět patrné nárůsty („špičky“) hodnot relativní vlhkosti. Tyto skokové nárůsty jsou úzce vázané na pohyb bubny. Během přechodu mezi směry rotace bubny se průtok vzduchu ustálí, čímž dojde ke snížení hodnot relativní vlhkosti. Při rozběhu a samotném běhu bubny je vzduch nuceně tlačěn ven z pracovního prostoru bubnové sušičky, což se projeví ve změně hodnot relativní vlhkosti. Pro potvrzení této hypotézy byly dodatečně sebrány hodnoty příkonu elektrické energie (Obrázek 3-9). Špičky nárůstu hodnot příkonu na stroji značí sepnutí elektromotoru a korespondují s nárůsty hodnot relativní vlhkosti. Naopak nízké hodnoty příkonu charakterizují pouze energii potřebnou pro chod ventilátoru.



Obrázek 3-9 Příkon bubnové sušičky

3.3.3. Vliv obsahu vlhkosti a hmotnosti vsázky na pohyb prádla

Pohyb prádla uvnitř bubnu je silně ovlivněn hmotností vsázky a obsahem vlhkosti v ní obsažen. Velká ložná hustota, tzn. že v bubnu je umístěno velké množství prádla s vysokým obsahem vlhkosti, vytváří odpor žebřím rotujícího bubnu. Spíše tedy než k „odhazování“ prádla napříč proudem vzduchu a bubnem samotným dochází k jeho odvalování v kohesivních svazcích. Výměna tepla a hmoty v této fázi je uskutečňována výhradně kondukcí prostřednictvím vnější vrstvy svazků. Tento druh pohybu je zejména v počáteční fázi procesu, kdy značná část tepelné energie je disipována odpařováním vody a teplota okolního vzduchu a stěn bubnu je významně větší než teplota povrchu prádla. [5]



Obrázek 3-10 Příklad pohybu vsázky ve formě kohesivních svazků (převzato z [12])

V pozdějším stádiu sušícího procesu je většina vlhkosti zapříčiňující soudržnost svazků prádla odvedena sušícím médiem a začnou se vytvářet menší celky (Deans je nazval jako „límce“). Tyto celky mají menší odpor vůči žebřům a prádlo začíná rotovat napříč bubnem. Sušící vzduch se díky většímu pohybu prádla snáze dostává do středu ložené vsázky a tato oblast je tudíž sušena přednostně. Když je hmotnost vsázky malá a prádlo je tedy téměř suché, žebrování bubnu způsobující jeho pohyb umožňuje některým kusům prádla axiální pohyb. [5]

Tabulka 8 Výstupní informace z experimentu

Suchá hmotnost vsázky [kg]	15 ± 0,05
Mokrá hmotnost vsázky [kg]	22,3 ± 0,05
Konečná hmotnost vsázky [kg]	18,1 ± 0,05
Počáteční množství vody v prádle [kg]	7,3
Konečné množství vody v prádle [kg]	3,1
Gramáž látky [kg/m ²]	0,525
Teplota okolního prostředí [°C]	20
Relativní vlhkost okolního prostředí [%]	50
Vstupní teplota sušícího média [°C]	70
Trvání cyklu [min]	21
Chladicí perioda [min]	5
Celková doba sušení [min]	26

4. Tepelná a hmotnostní bilance bubnové sušičky

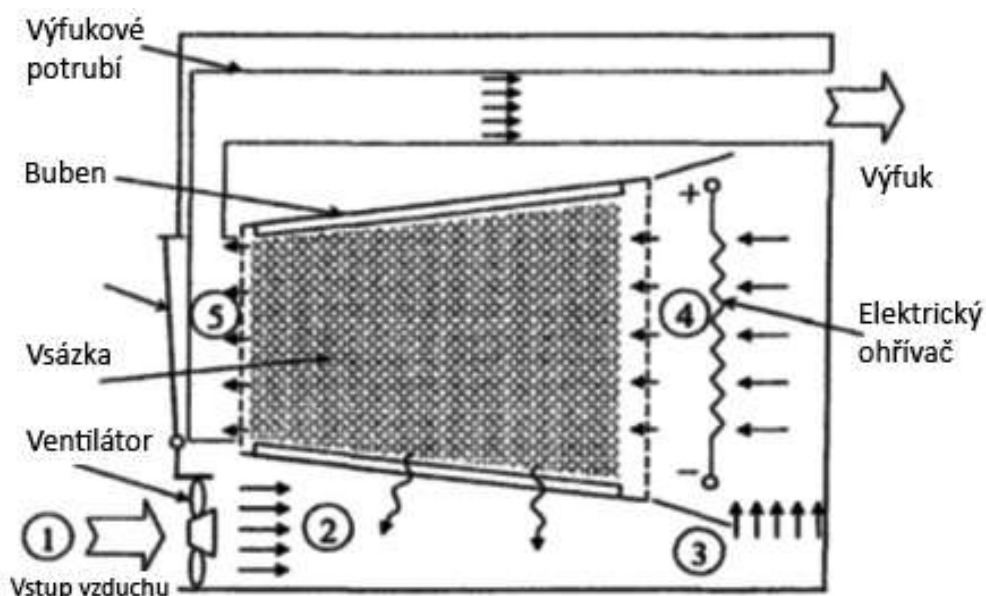
V předchozí kapitole 3 je uveden zevrubný popis experimentu, který byl proveden u účelem získání vstupních dat do bilančního modelu. Cílem bylo opatřit nezbytná data pro analytické řešení sušení v bubnové sušičce prádla. S využitím těchto pevně daných dat, tímto jsou myšlena výstupní data z experimentu, lze určit stupně volnosti modelu. Vývoj bilančního modelu je formulován v této kapitole.

4.1. Přehled publikací zabývajících se sušením

V přípravné fázi zpracování této práce samotné byl proveden obsáhlý průzkum dostupné literatury věnované sušení jako takovému. V odborných člancích lze narazit na řadu vědeckých prací, které se zabývají sušením porézních materiálů a uvolňováním vlhkosti uzamčené v jejich pórech. Souhrnně je možné konstatovat, že valná většina dostupné literatury pojednává o sušení v mikro měřítku a je přizpůsobována pouze jednomu fyzikálnímu ději (např. k výměně tepla dochází pouze konvekcí a vedení tepla vlákny materiálu je zanedbán). Relevantní literaturu vhodnou pro další využití v této práci vytvořil již zmiňovaný Deans [5] nebo také Yadav s Moonem [20]. Tyto dvě publikace jsou zaměřeny na deriváty velkokapacitních průmyslových sušiček, tedy na menší domácí jednotky. Domácí jednotky jsou zde řešeny jako celky a popisují kompletní distribuci vzduchu skrz sušičku. Změnu stavu vzduchu od nasátí ventilátorem, průletu ohřivačem a bubnem až po odfuk. Právě makro pohled na zařízení je rozhodujícím aspektem pro využití uvedené literatury při zpracování této práce.

4.1.1. Yadav, Moon – Proces sušení vláken v domácích sušičkách

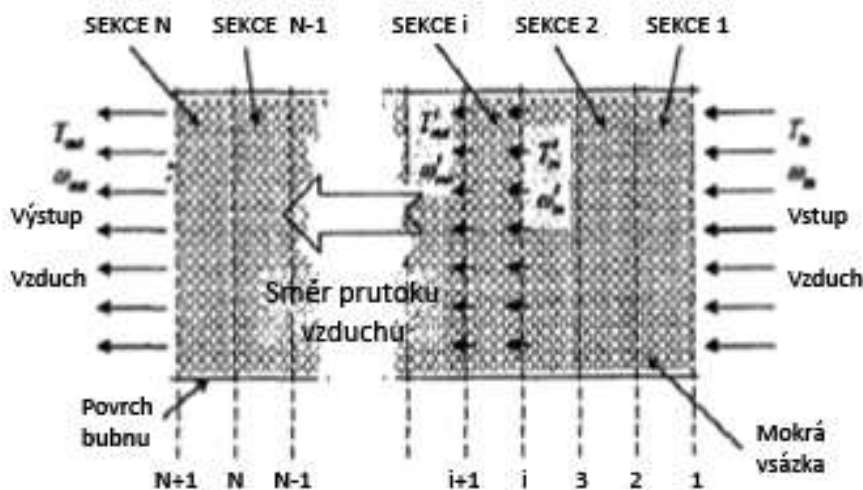
Tato publikace z převážné většiny zkoumá spotřebu elektrické energie během celého sušicího cyklu jedné vsázky a množství kWh elektrické energie připadající na jedno kilo odpařené vody, tzv. SMER („specific moisture extraction rate“ – měrný poměr odpařené vlhkosti). Analyzovaným zařízením je zde domácí bubnová sušička o kapacitě 4,5 kg s axiálním prouděním sušicího média. V části zabývající se změnou stavu proudícího média a energetickou bilancí je proveden podrobný popis tepelných toků. Do použitých vztahů je zahrnuta i zahřívací perioda, která je v porovnání s celkovým časem sušení, zanedbatelná.



Obrázek 4-1 Schéma konvenční domácí sušičky (převzato z [20])

Kinetika sušení prádla je popisována jako děj, který zahrnuje řadu proměnných jako funkci teploty a vlhkosti s ohledem na čas. Střední hodnoty těchto proměnných mohou být získány integrací příslušných řídicích diferenciálních rovnic pro přenos tepla a vlhkosti uvnitř porézního materiálu. Řešení řídicích rovnic vyžaduje znalost hodnot součinitele přestupu tepla α a součinitele přestupu hmoty k , které jsou v čase proměnné, čímž značně komplikují samotné řešení rovnic. [20] Kvůli vyhnutí se komplikovanému řešení jsou vztahy linearizovány.

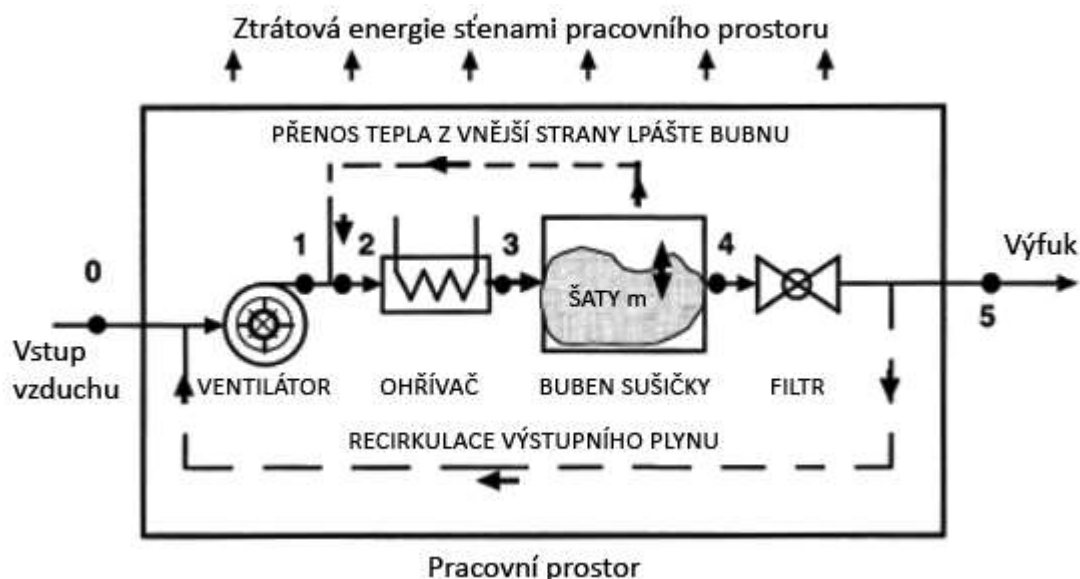
Pro numerické řešení sestaveného systému rovnic je v tomto případě použita prostorová diskretizace ve směru toku vzduchu (axiálním) spolu s časovou diskretizací. V podkapitole 3.3 se pojednává o pohybu prádla uvnitř bubnu, kde vlivem rotace bubnu dochází k převalování prádla. Převalování prádla způsobuje neustálou výměnu horních vrstev vsázky za spodní vrstvy vsázky. Tato záměna vrstev má za důsledek náhodné šíření vlhkosti buňkami. Jinými slovy, na hranicích buněk by nebyla hodnota vlhkosti konstantní, kdyby se tento postup aplikoval na diskretizaci ve směru toku vzduchu analyzovaném v této diplomové práci. Tedy ve směru radiálním. Ukázka prostorové diskretizace je na Obrázek 4-2 níže.



Obrázek 4-2 Diskretizace bubnu (převzato z [20])

4.1.2. J. Deans – Modelování domácí bubnové sušičky

Stejně jako v předchozí podkapitole publikace pojednává o malé domácí jednotce s axiálním průtokem média bubnem. Výrazně se však liší ve způsobu bilancování a diskretizace jednotky. Bilance je provedena metodou „black box“, při níž je důraz kladen především na vstupní, výstupní hodnoty veličin. Akumulace uvnitř hranic řešené oblasti však není řešena podrobně. Právě makro pohled na procesy odehrávající v sušičce prádla značně ulehčí způsob řešení rovnic pro popis systému. Omezení diskretizace pouze na časovou napříč celou řešenou oblastí výrazně usnadní práci s časově proměnnými součiniteli pro přenos tepla a hmoty. Díky těmto zjednodušujícím faktorům slouží zmíněná publikace jako výhradní zdroj informací pro tuto diplomovou práci. Hranice řešené oblasti pro případ této publikace je znázorněn na Obrázek 4-3.



Obrázek 4-3 Hranice oblasti Deansova modelu (převzato z [5])

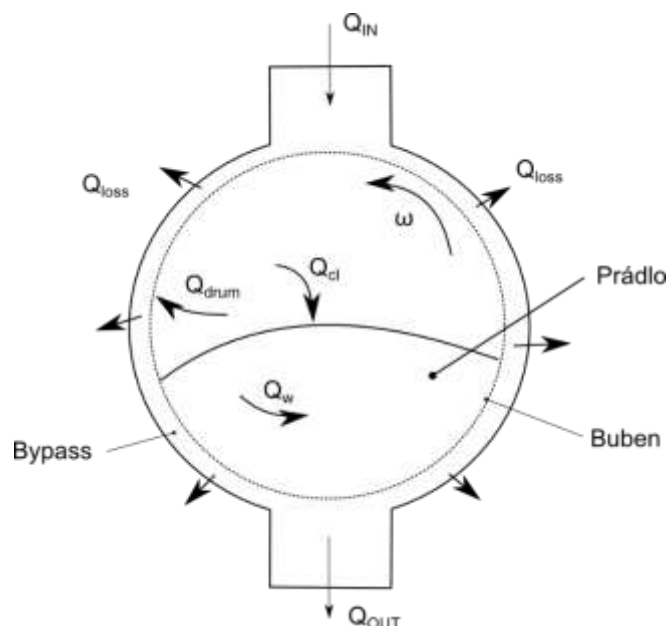
4.2. Omezující parametry bilančního modelu

Před samotným sestavením modelu je nejprve nutné určit jeho oblast platnosti. Jak již bylo zmíněno výše (podkapitola 1.3), sušící proces je velice komplikovaný a řídí se dvěma zákony – druhým Fickovým zákonem (sdílení hmoty) a druhým Newtonovým ochlazovací zákon (přenos tepla konvekcí). Tyto dva zákony jsou popsány diferenciálními rovnicemi druhého řádu, v nichž vystupuje difuzní součinitel D , respektive součinitel přestupu tepla α , jehož průběh je funkcí teploty a je časově závislý. Toto chování značně komplikuje řešení řídicích rovnic. Pro zjednodušení byly zavedeny následující předpoklady: [5], [20]

- Termo-fyzikální vlastnosti vláken materiálu jsou konstantní v celém objemu
- Okamžitá distribuce vlhkosti v proudícím médiu je konstantní
- Teplota vláken, vody a bubnu jsou stejné
- Teplo proudícího vzduchu klesá radiálně podél bubnu
- Průtok a teplota vzduchu je konstantní

4.3. Transientní bilance

Z předchozího rozboru je patrné, že pohyb prádla není jednoduché popsat. Pohyb je závislý na ložné hmotnosti vsázky a počátečním obsahu vlhkosti v prádle. Při vysoké ložné hmotnosti a vysokém obsahu vlhkosti se prádlo „převaluje“ ve formě kohezivních svazků. Přenos tepla je řízen výhradně konvekcí prostřednictvím vnější vrstvy svazků. Vlhkost obsažená v prádle má tendenci se chovat jako „lepidlo“. Vyšší hodnoty dělají prádlo soudržnějším. S nižšími hodnotami je prádlo oddělováno a sušící médium lépe prostupuje do jeho spodních vrstev (viz podkapitola 3.3.3). Zejména pro tyto okolnosti byl k analytickému popisu zvolen model založený především na vstupních a výstupních podmínkách. [5]



Obrázek 4-4 Bilanční hranice bubnové sušičky

Principy jednoduché bilance (zákon zachování energie) platí pro jeden konkrétní bod v čase, respektive plně v rozsahu ustáleného průběhu vstupních a výstupních veličin.

$$E_{in} = E_{out} + E_{loss} \quad (4.1)$$

Sušicí proces se z pohledu časové osy dělí do tří period – zahřívací, konstantní a klesající periody (viz podkapitola 1.4). V každé z dílčích period je dominantní jiný fyzikální proces, tudíž se v tomto případě jedná o neustálený systém. Pro neustálený systém byla zvolena tzv. transientní bilance. Transientní bilance popisuje systém, u kterého jsou vstupní a výstupní veličiny časově závislé.

$$E_{in} - E_{out} - E_{loss} = E_{ac} \quad (4.2)$$

4.3.1. Přenos tepla

Tepelný tok vstupující do pracovního prostoru je zajištěn ohříváním sušícího média přes výměník. Jak vzduch proudí pracovním prostorem, dochází k absorbování tepla obsaženého v médiu do stěn pracovního prostoru, bubnu a prádla. Aby docházelo k odpařování vlhkosti, musí být do vody dodaná tepelná energie, což způsobuje další přídavnou absorpci tepelného toku od proudícího média. S ohledem na rovnici (4.2) je pak tepelná bilance:

$$\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{loss} - \dot{Q}_{evap} - \dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{ac} \quad (4.3)$$

$$\dot{Q}_{ac} = \dot{Q}_{drum} + \dot{Q}_{H_2O} + \dot{Q}_{cl} \quad (4.4)$$

Teplo akumulované vlhkostí, bubnem a prádlem samotným je určeno ze vztahů (4.5) až (4.7).

$$\dot{Q}_{drum} = m_{drum} \cdot cp_{drum} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (4.5)$$

$$\dot{Q}_{H_2O} = m_{H_2O} \cdot cp_{H_2O} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (4.6)$$

$$\dot{Q}_{cl} = m_{cl} \cdot cp_{cl} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (4.7)$$

Díky předpokladu zavedenému v podkapitole 4.2 (teplota vláken, vody a bubnu jsou stejné), lze po dosazení rovnice (4.4) a následné úpravě s využitím vztahů (4.5) až (4.7) získat okamžitou teplotu prádla. [5]

$$\frac{dT_{cl}}{dt} = \frac{\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} - \dot{Q}_{evap} - \dot{Q}_{loss}}{m_{drum} \cdot cp_{drum} + m_{H_2O} \cdot cp_{H_2O} + m_{cl} \cdot cp_{cl}} \quad (4.8)$$

Deans ve své práci publikoval logaritmický vztah mezi vstupní a výstupní teplotou, jehož řešením lze získat hodnotu výstupního tepelného toku, kde cp_{avg} značí vážený průměr tepelných kapacit. [5]

$$\frac{T_{out} - T_{cl} - \frac{\dot{Q}_{evap} - \dot{Q}_{loss}}{\alpha \cdot A}}{T_{in} - T_{cl} - \frac{\dot{Q}_{evap} - \dot{Q}_{loss}}{\alpha \cdot A}} = e^{-\frac{\alpha \cdot A}{m_{air} \cdot cp_{avg}}} \quad (4.9)$$

$$cp_{avg} = \frac{m_{drum} \cdot cp_{drum} + m_{H_2O} \cdot cp_{H_2O} + m_{cl} \cdot cp_{cl}}{m_{drum} + m_{H_2O} + m_{cl}} \quad (4.10)$$

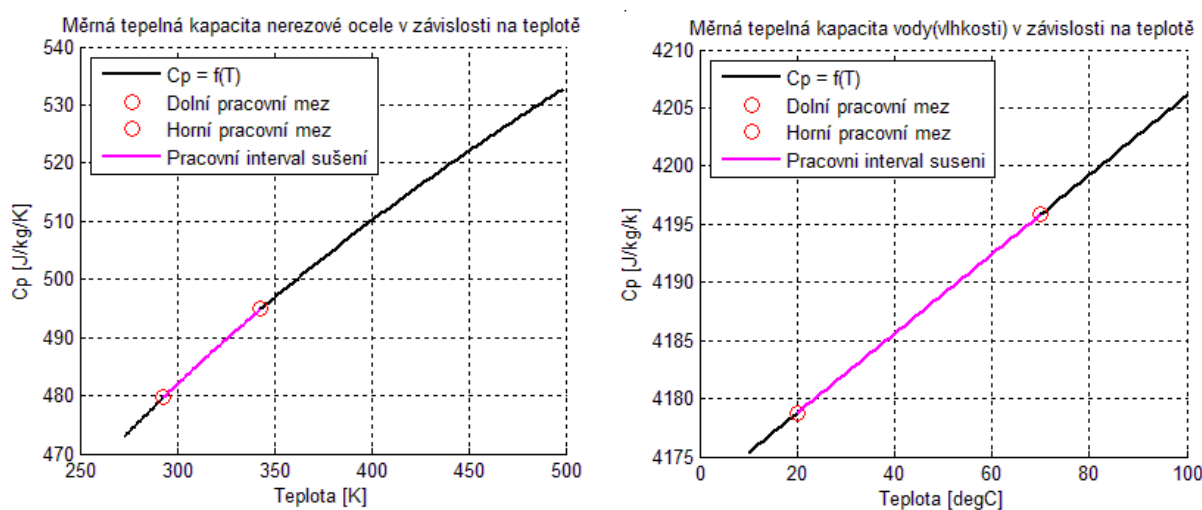
Měrné tepelné kapacity jsou funkcí teploty fázového rozhraní vzduch – prádlo, jenž je určena jako průměr teplot prádla a sušícího média, viz rovnice (4.11).

$$T_f = \frac{T_{air} + T_{cl}}{2} \quad (4.11)$$

Měrná tepelná kapacita bubnu pro nerezovou ocel je určena ze vztahu (4.12). [3]

$$cp_{drum} = 6,683 + 0,04906 \cdot T + 80,64 \cdot \ln(T), T [K] \quad (4.12)$$

Teplotní závislost tepelných kapacit vody a bubnu lze vidět na obrázku 27. V předpokládaném rozsahu teplot během sušení se hodnoty cp mění v rozsahu 3,1 % u nerezové ocele, respektive 0,4 % u vody.



Obrázek 4-5 Závislost tepelné kapacity na teplotě

4.3.2. Přenos hmoty

Vypařování vlhkosti z povrchu sušeného materiálu způsobuje navýšení obsahu vlhkosti v sušícím médiu. Množství odpařené vody a změna vlhkosti vzduchu je vyčíslena z průměrného množství přenesené hmoty mezi vzduchem a vláknem. [20]

$$\dot{m}_{evap} \cdot (x_{in} - x_{out}) = k \cdot A \cdot \left(a \cdot x_f - \frac{x_{in} + x_{out}}{2} \right) \quad (4.13)$$

Rovnice (4.13) byla linearizována, protože změna ve vlhkosti vzduchu podél bubnu je relativně malá v porovnání s rozdílem vlhkostí na povrchu prádla a vzduchu. Koeficient aktivity vyvinutý Lambertem je určen ze vztahu (4.14). [20]

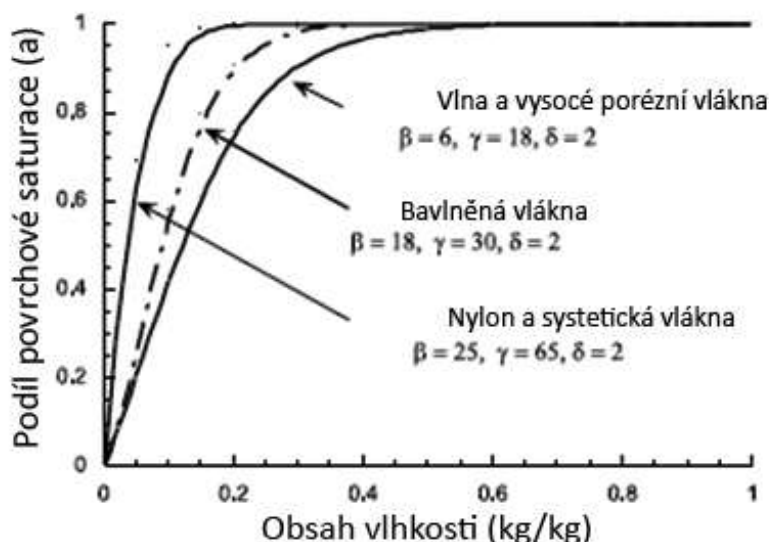
$$a = 1 - \frac{\beta \cdot X + \delta}{1 + \delta \gamma^X} \quad (4.14)$$

Koeficient aktivity (rovnice (4.14)), který se je použit pro výpočet množství přenesené hmoty mezi povrchem prádla a vzduchem, je funkcí množství obsažené vlhkosti v prádle.

$$X = \frac{m_{wet} - m_{dry}}{m_{wet}} \quad (4.15)$$

$$X = \frac{m_{wet} - m_{dry}}{m_{dry}} \quad (4.16)$$

Výpočet množství bezrozměrné vlhkosti v prádle lze vztáhnout buď na suchou hmotnost prádla, anebo na hmotnost prádla mokrého (s již obsaženou vlhkostí). Rozdíl v použití vztahů (4.15) a (4.16) činí přibližně 48,5 %, proto musí být způsob výpočtu bezrozměrného množství obsažené vody v prádle volen s opatrností. Použití výpočtu množství vody vztaženého na mokrou hmotnost se využívá pro materiály, které s obsahem vlhkosti mění svůj objem (uhlí). U materiálů, jejichž objem je na obsahu vody nezávislý se používá rovnice (4.16).



Obrázek 4-6 Typické desorpční isotermy vláken (převzato z [13])

Typické isotermy vysoce porézních vláken vlny, nízko porézních vláken nylonu a bavlny jsou vyobrazeny na obrázku 28. Experiment byl proveden pouze s vlákny z vlny. Průběh desorbční isotermy bavlny ukazuje, že povrch bavlněného prádla je saturovaný po většinu dobu sušení. Až v pozdější fázi začnou desorpční isotermy klesat a dojde k projevu rozdílů v druhu sušeného materiálu. [20]

Hnací síla přestupu hmoty je realizována prostřednictvím rozdílů vlhkosti na povrchu materiálu a sušícím médiem. Je důležité upozornit, že se nejedná o sílu takovou, jak je obecně známa (Newtonskou). Hnací síla vyjadřuje míru rychlosti přestupu hmoty. Čím je rozdíl vlhkostí větší, tím je hnací síla vyšší a dochází rychleji k odpařování vody na povrchu sušeného materiálu. V případě nižšího rozdílu vlhkostí je hnací síla menší, tudíž se děj stává pomalejším. Fázové rozhraní mezi sušícím médiem a sušeným materiálem, ve kterém je obsažen jakýkoliv podíl vlhkosti, je považováno za saturované a hodnota obsahu vlhkosti ve fázovém rozhraní se stanoví jako: [16]

$$x_f = 0,662 \cdot \frac{P_{sat}}{P - P_{sat}} \quad (4.17)$$

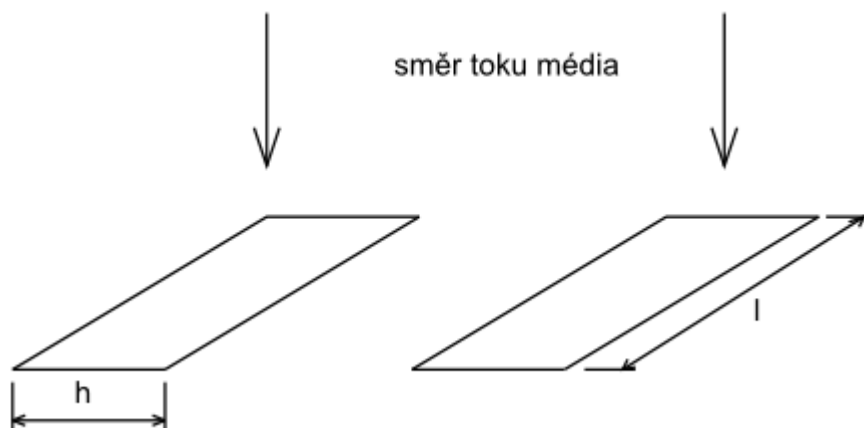
Saturační tlak v rovnici (4.17) je funkcí teploty fázového rozhraní, jenž se stanoví jako:

$$P_{sat} = \frac{1}{T_f^{8,2}} \cdot e^{77,345 + 0,0057 \cdot T_f - 7235 \cdot T_f^{-1}}, T_f [K] \quad (4.18)$$

4.4. Součinitel přestupu tepla a hmoty

Navržený bilanční model vyžaduje znalost součinitele přestupu tepla α . Správné určení součinitele přestupu tepla bývá velice problematické, neboť se jedná o čistě empirický parametr. Získání jednoznačných hodnot pro součinitel přestupu tepla bývá často možné pouze experimentálně. Je důležité zmínit, že k výměně tepla dochází v jednom okamžiku mezi bubnem, stěnami pracovního prostoru a prádlem. Pro každý tento tepelný tok je nezbytné určit součinitel přestupu tepla separátně. Metodika výpočtů publikovaná Deanssem, jenž vychází primárně z vstupních a výstupních podmínek, počítá pouze s jedním celkovým součinitelem přestupu tepla.

Empiricky odvozené vztahy pro získání součinitele přestupu tepla α jsou závislé na charakteru proudění (laminární, turbulentní, přechodové) a geometrii studovaného problému. V případě této studie byl proveden rozbor dostupné literatury o hledání vhodného vztahu pro určení příslušného součinitele. Geometrie pracovního prostoru bubnové sušičky je koncipována jako dva sousední válce, z nichž vnější je statický a vnitřní je rotující s radiálním tokem sušícího média. Nejblíže nalezeným typem toku srovnatelným s analyzovaným v této práci tzv. Taylor – Couettův tok. Tento typ toku je definován jako axiální tok tekutiny skrze dva koaxiální válce, které jsou dostatečně blízko sebe. Uvnitř prostoru mezi válci je výrazný projev viskozity. [10] Tedy jediná odlišnost mezi koncepcemi studované bubnové sušičky a Taylor – Couettovým tokem je směr toku, z čehož je patrné, že dostupné vztahy nelze použít. Dalším typem dostupných vztahů jsou takové, které řeší radiální tok okolo rotujícího válce. Tyto vztahy lze použít pouze v případě, že by nedocházelo k ovlivnění proudění od vnější stěny bubnu. Jinými slovy, vnější hranice oblasti (ve kterém proudí médium) jsou od bubnu nekonečně vzdálené. Možným způsobem jak analyticky odhadnout součinitel přestupu tepla je řešit tok média jako tok paralelními kanály a následně určit pro tuto průtočnou plochu hodnotu Reynoldsova čísla.



Obrázek 4-7 Vizualizace průtočné plochy

Reynoldsovo číslo a adekvátní hydraulický průměr je pak:

$$D_h = \frac{4 \cdot S}{O} = 2 \cdot \frac{h \cdot l}{h + l} \quad (4.19)$$

$$Re = \frac{\dot{V} \cdot D_h \cdot \rho_{air}(T_{air})}{S \cdot \eta_{air}(T_f)} \quad (4.20)$$

Nusseltovo číslo, z něhož se následně určí součinitel přestupu tepla α , je určeno jako externí radiální tok okolo statického válce. [11]

$$\overline{Nu}_D = 0,3 + \frac{0,62 \cdot Re_D^{0,5} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}}{\left(1 + (0,4 \cdot Pr^{-1})^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{1}{4}}} \cdot \left(1 + \left(\frac{Re_D}{2,82 \cdot 10^5}\right)^{\frac{5}{8}}\right)^{\frac{4}{5}} \quad (4.21)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{\overline{Nu}_D \cdot \lambda_{air}(T_f)}{D_{drum}} \quad (4.22)$$

Pomocí Lewisova čísla, jenž je definováno jako poměr mezi termální difúzí a difúzí hmoty, lze určit hodnotu součinitele přestupu hmoty k .

$$Le = \frac{\lambda_{air}(T_f)}{\rho_{air} \cdot c_{p_{air}}(T_f) \cdot D(T_f)} \quad (4.23)$$

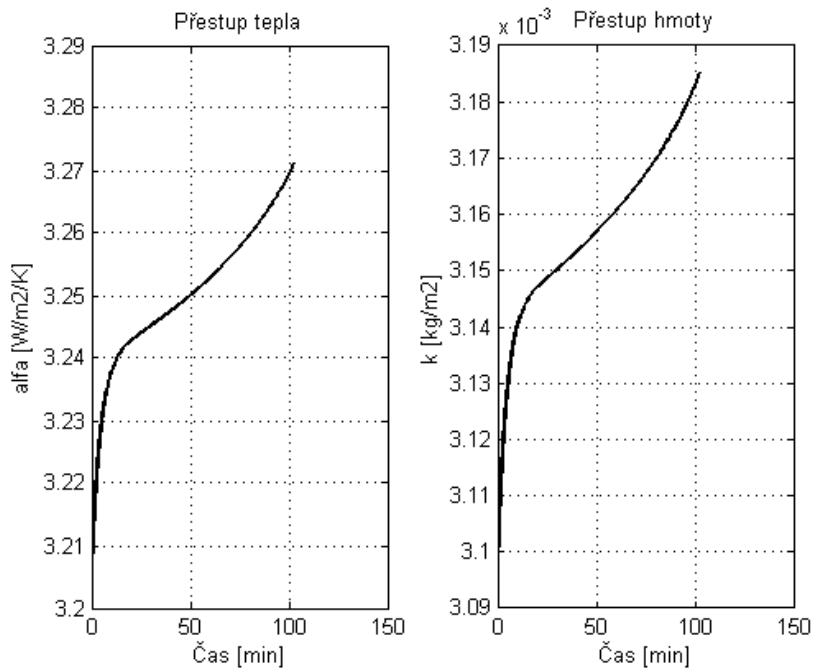
Difuzní součinitel v rovnici (4.23) pro přenos látky v systému voda – vzduch je vyčíslen pomocí vztahu, který byl vyvinut autory Boltzman a Tuve (1976) jako polynomický rozvoj teploty fázového rozhraní.

$$D = -2,775 \cdot 10^{-6} + 4,479 \cdot 10^{-8} \cdot T_f + 1,656 \cdot 10^{-10} \cdot T_f^2, T_f [K] \quad (4.24)$$

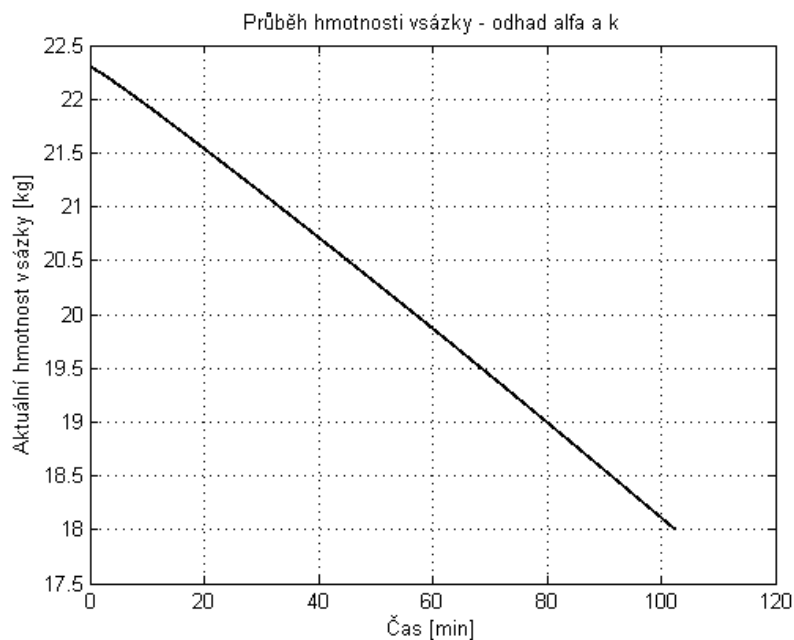
Z analogie mezi přenosem tepla a hmoty a s využitím rovnic (4.21) až (4.24) může být určena průměrná hodnota součinitele přestupu hmoty. [11]

$$\bar{k} = \frac{\bar{\alpha}}{\rho_{air} \cdot c p_{air} \cdot Le^{\frac{2}{3}}} \quad (4.25)$$

Se známými hodnotami těchto součinitelů byla provedena simulace sušícího cyklu, jehož průběh je možné vidět na Obrázek 4-9 níže. Průběh součinitelů přestupu tepla a hmoty vyčíslených s tímto přístupem je vyobrazen níže na Obrázek 4-8.



Obrázek 4-8 Odhad součinitele přestupu tepla a hmoty



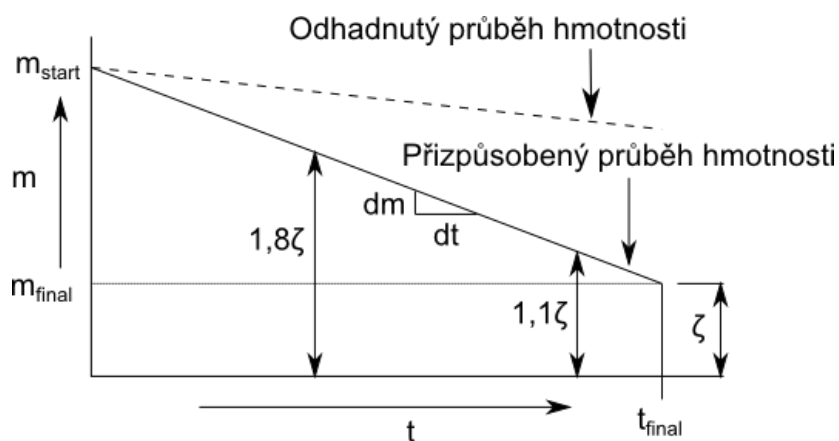
Obrázek 4-9 Průběh hmotnosti vsázky – odhad α a k

Z průběhu aktuální hmotnosti vsázky provedené simulace je zřejmé, že úbytek hmotnosti sestaveného bilančního modelu má lineární charakter, což koresponduje s linearizací rovnice (4.13) pojednávající o množství odvedené vlhkosti. Obrázek 4-9 ukazuje, že s takto vypočtenými součiniteli přestupu tepla a hmoty by celková doba sušení trvala 102,4 minut. Vypočtená doba sušení je přibližně 5x delší v porovnání s dobou trvání experimentálního měření (Tabulka 8).

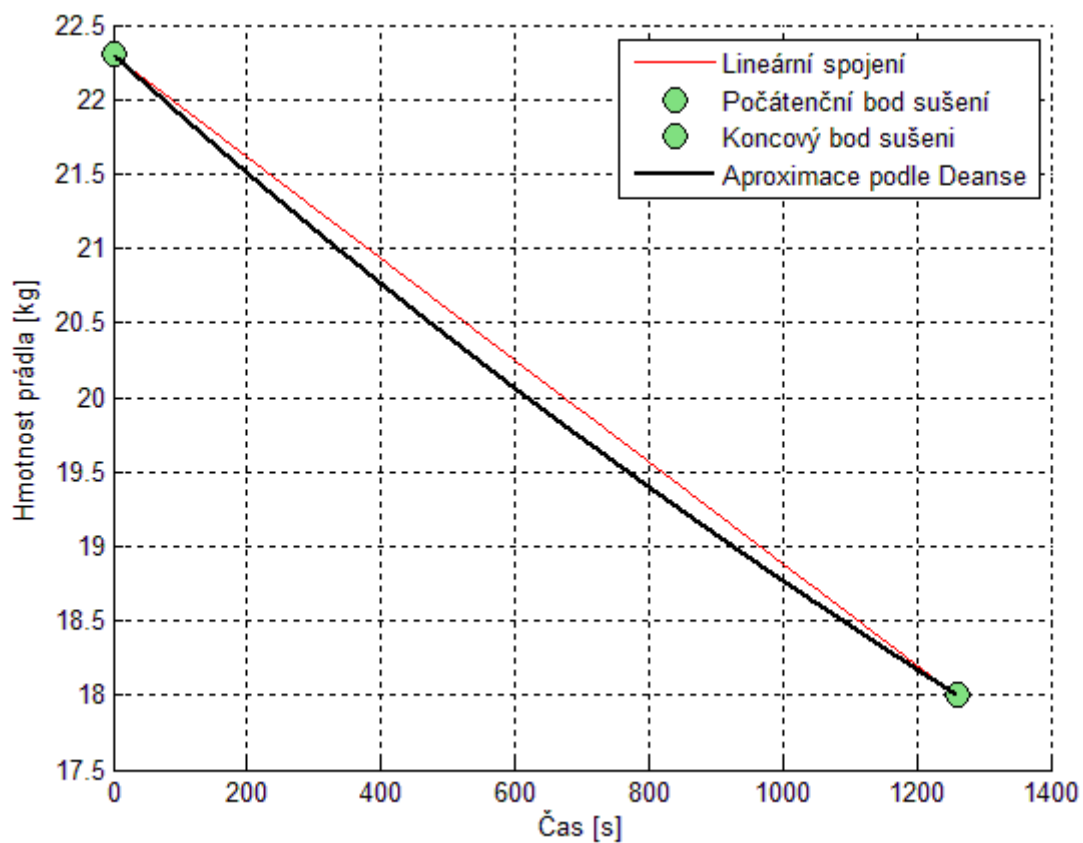
Z výše prezentovaných výsledků je patrné, že takto odhadnuté hodnoty součinitelů přestupu tepla a hmoty jsou nesprávné, neboť celková doba sušení byla několikanásobně překročena. Pokud provedeme rozbor veličin vstupujících do řídicích rovnic transientního bilančního modelu (rovnice (4.8), (4.9) a (4.13)), lze pozorovat funkční závislost výstupních veličin na hodnotách součinitelů α a k . Z uvedených podobnostních kritérií, které byly použity pro odhad těchto dvou empirických konstant, vyplývá jejich vzájemná korelace. Správné určení součinitele přestupu tepla α je tedy důležitější než mohlo být na první pohled patrné.

Deans během experimentů publikovaných ve svém článku provedl měření pro určení zmíněného součinitele α . Výsledky jím provedeného měření se však v dostupné literatuře nepodařilo dohledat. V experimentu, z kterého čerpá vstupní veličiny tato případová studie, nebylo koncipováno žádné měření pro určení součinitele přestupu tepla.

Platné hodnoty součinitelů je možné nadefinovat přizpůsobením průběhu aktuální hmotnosti vsázky (Obrázek 4-9) naměřeným datům v daném časovém rozmezí experimentu. Cílem je vytvořit přímkové propojení počátečního a koncového bodu sušení. Přímkové propojení je zvoleno kvůli linearizaci řídicí rovnice (4.13) pro přenos hmoty. Pro takto vytvořené propojení se určí hodnoty koeficientu ζ v diskretizovaných bodech. Po vyčíslení těchto hodnot se jimi podělí průběh hmotnosti vsázky uvedený na Obrázek 4-9 výše, čímž se získá linearizovaný průběh hmotnosti provedeného experimentu. Princip přizpůsobení simulačního modelu experimentálními datům je znázorněn na Obrázek 4-10 níže.



Obrázek 4-10 Princip přizpůsobení modelu



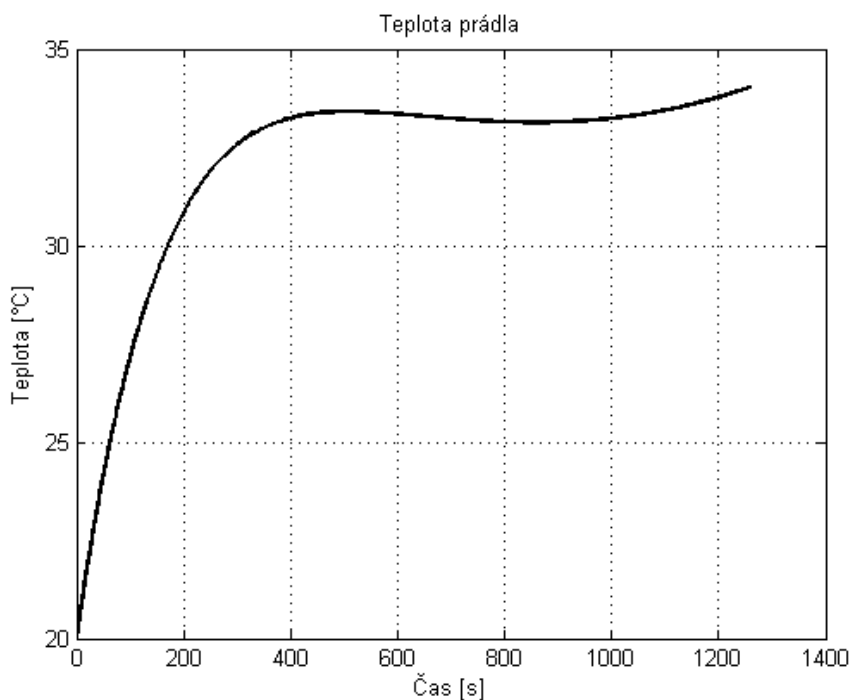
Obrázek 4-11 Aproximovaný průběh hmotnosti

4.5. Analýza výsledků simulace

Začátkem této kapitoly je důležité připomenout, že fyzikální vlastnosti sušícího média jsou počítány při teplotě fázového rozhraní. Teplota rozhraní je stanovena jako průměr aktuální teploty prádla a vzduchu. Z těchto veličin byly následně určeny podobnosti kritéria, která vstupovala do vztahů sloužících k určení součinitele přestupu tepla a hmoty, jenž mají značný vliv na průběh sestaveného transietního bilančního modelu. „*Použití průměrných hodnot uvnitř bubnu sušičky charakterizovat teplotu prádla a teplotu vzduchu způsobuje chyby, ale tyto chyby nebyly shledány značnými.*“ (citace z [5])

4.5.1. Vliv součinitele přestupu tepla α

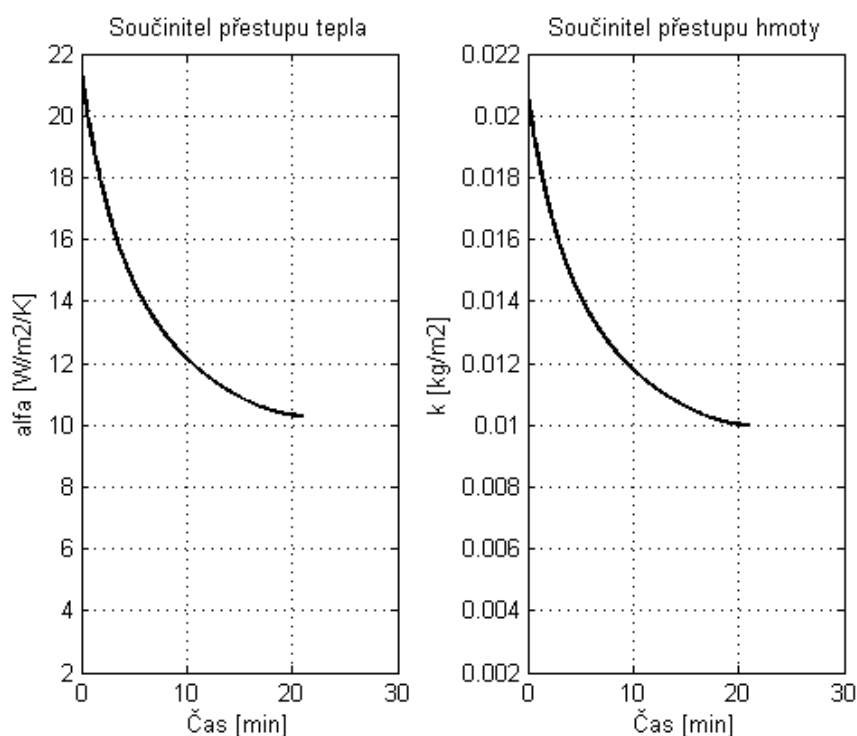
Z průběhu vypočítaných hodnot součinitele přestupu tepla lze pozorovat (Obrázek 4-13), že na počátku dochází vlivem významného rozdílu teplot prádla a sušícího média ke značnému tepelnému toku do vláken prádla a obsažené vlhkosti. Tento tepelný tok zahřívá vlákna sušeného materiálu. Část tepla z tepelného toku přeneseného do prádla způsobuje odpaření povrchové vlhkosti. V pozdější fázi sušení se teplota prádla ustálí, respektive vykazuje mírně proměnnou tendenci. (rozdíl v 0,1 %). Proměnný charakter je způsoben zanesením chyby při výpočtech fyzikálních veličin při teplotě fázového rozhraní. Doba, po kterou zůstává teplota prádla konstantní, charakterizuje konstantní periodu sušení (více v podkapitole 1.4) [5]. Průběh teploty prádla na Obrázek 4-12 znázorňuje pouze tuto konstantní periodu, neboť po ukončení sušícího cyklu je v prádle stále obsaženo 20 % z původního množství vody. Toto množství vody je dostačující k udržení saturační vlhkosti na povrchu prádla a teplota zůstává konstantní.



Obrázek 4-12 Vývoj teploty prádla v čase

4.5.2. Vliv součinitele přestupu hmoty k

V prvních okamžicích sušícího cyklu jsou hodnoty součinitele přestupu hmoty k vysoké (viz Obrázek 4-13). Tyto vysoké hodnoty značí odvod volné vlhkosti z povrchu materiálu. Lineární průběh hodnot součinitele k souvisí s konstantní periodou sušícího cyklu. Klesající tendence znamená nižší odvod vlhkosti za jednotku času. Na počátku sušícího cyklu je obsah vlhkosti v prádle vysoký s velkým podílem volné vlhkosti. S úbytkem volné vlhkosti klesá rychlost sušení a dochází k odpařování vázané vlhkosti. Vázaná vlhkost je nejprve distribuována ze středu vlákna na její povrch, aby mohlo dojít k jejímu odvodu do sušícího média. V pozdější fázi, kdy je dosaženo kritické hodnoty vlhkosti v prádle, dochází v průběhu součinitele přestupu hmoty k patrnému zlomu. Tento zlom je charakteristický pro přechod mezi konstantní a klesající periodou. Během klesající periody se obsah vlhkosti limitně blíží hodnotě rovnovážné vlhkosti mezi sušícím médiem a sušeným materiálem, což má za následek výrazný pokles rychlosti sušení.

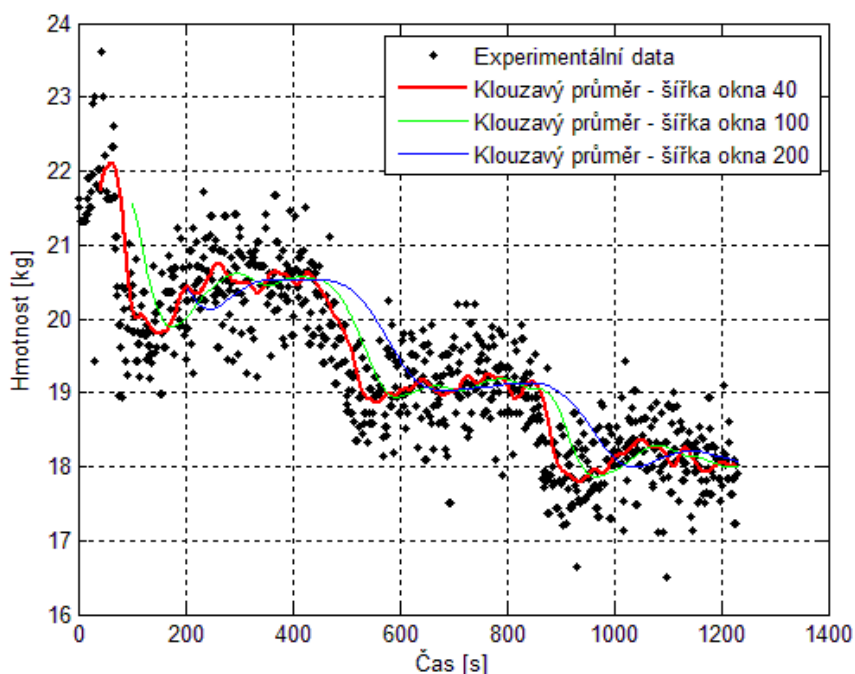


Obrázek 4-13 Průběh součinitele α a k

4.5.3. Statistický rozbor průběhu hmotnosti

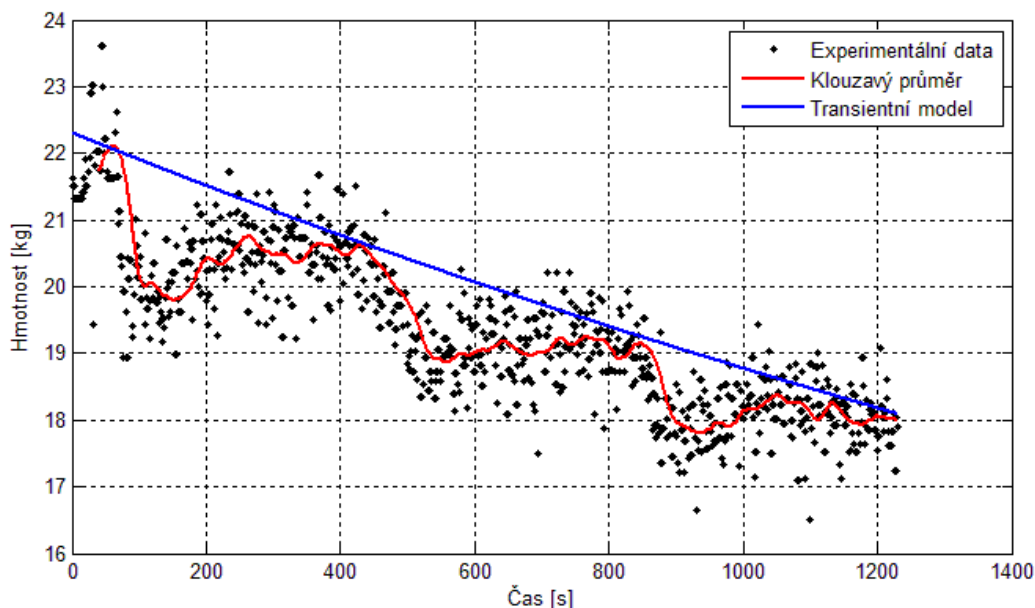
Naměřená hmotnostní data vsázky jsou získávána z tenzometrického snímače umístěného na stojinách bubnové sušičky. Externě umístěný tenzometr zaznamenává nejen hodnoty hmotnosti vsázky ale i veškerého dalšího obsahu, který je do nebo na aparát umístěn. Tento způsob získávání dat z experimentu zatěžuje data systematickou chybou, jež je generována napouštěním páry do výměníku tepla pro ohřev sušícího média. Kromě této systematické chyby jsou data zatíženy nahodilou chybou v podobě převalování prádla v bubnu, což se projeví oscilací bodových hodnot hmotnosti okolo hodnot váženého průměru.

K očištění dat od vzniklého šumu je použit jednoduchý typ klouzavého průměru, který se hově v těchto případech využívá. Při sestavování klouzavého průměru je důležité vhodně volit délku okna, které ovlivňuje jeho výslednou křivku. Pomocí klouzavého průměru lze popsat trend dat. Experimentální hodnoty spolu s trendem klouzavého průměru jsou uvedeny na Obrázek 4-14.



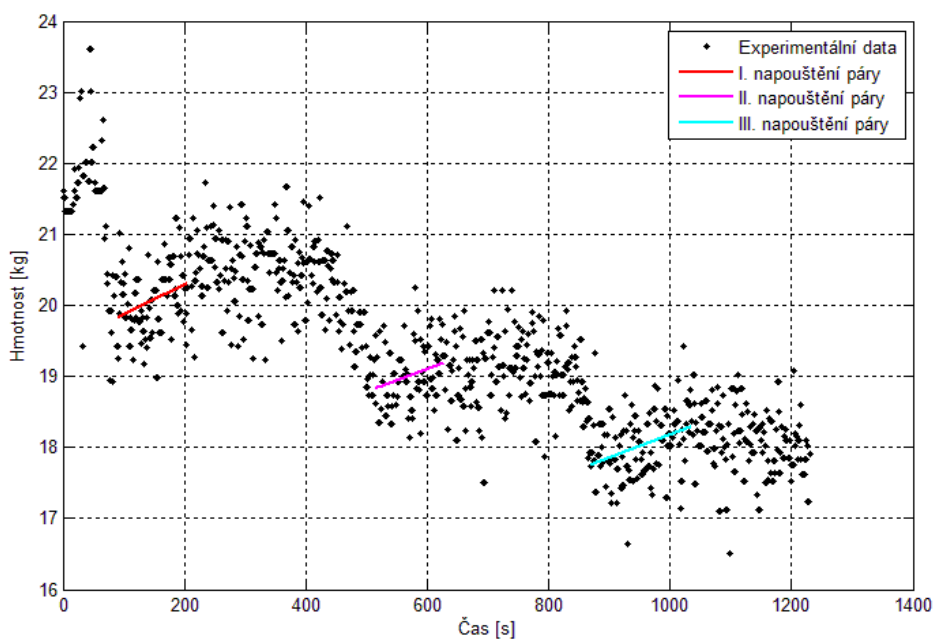
Obrázek 4-14 Klouzavý průměr

Vykreslením vypočítaných hodnot hmotnosti prádla pomocí transientního modelu a trendem dat (klouzávý průměr) lze tyto dvě série dat vzájemně porovnat. Porovnání tendence hmotnostních dat a simulace je uvedeno na Obrázek 4-15.



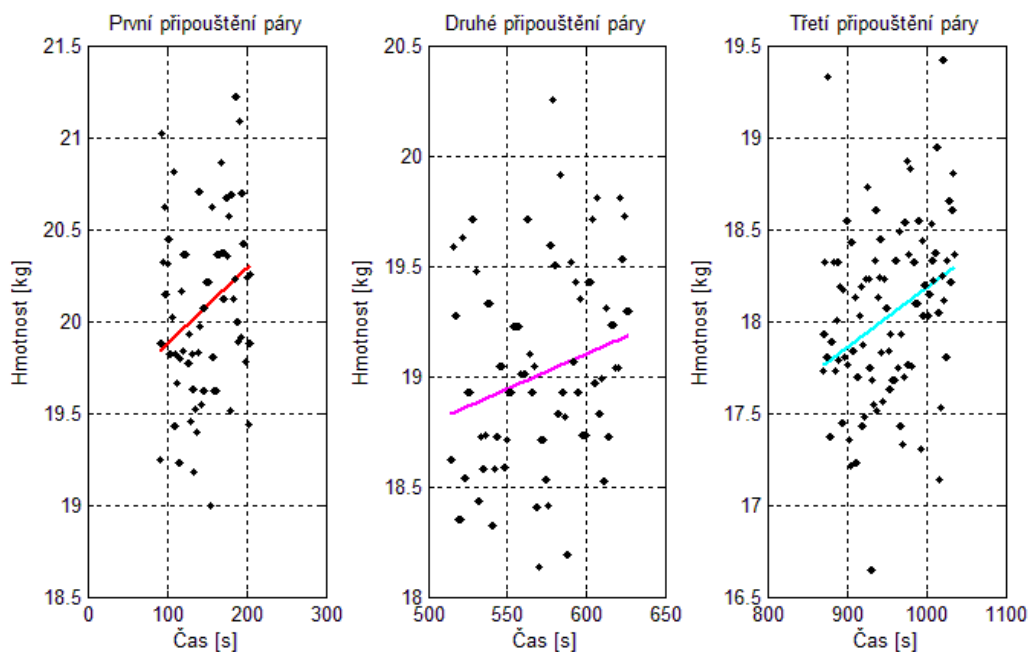
Obrázek 4-15 Porovnání trendu dat a transientního modelu

Klouzávý průměr byl zahrnut do rozboru hmotnostních dat s úmyslem očistit data nejen od šumu, ale i od nahodilé chyby způsobené připouštěním páry do výměníku. I přes různé hodnoty šířky okna se nepodařilo tuto chybu odstranit, neboť naměřená data mají příliš velký rozptyl. Dobu, kdy je otevřen připouštěcí ventil lze identifikovat na naměřených hodnotách hmotnosti vzrůstající tendencí jejich hodnot. Po napuštění páry do výměníku tepla se ventil uzavře a nárůst hmotnosti se zastaví. Pokles dat mezi dobou napouštění charakterizuje odvod kondenzátu. Celkový pohled na připouštění páry do výměníku je uveden na Obrázek 4-16.



Obrázek 4-16 Připouštění páry do výměníku tepla

Pro odhad množství přivedené páry do výměníku byl z hmotnostních dat vizuálně odebrán vzorek, u kterých je patrná rostoucí tendence. Takto odebrané data byly pomocí metody nejmenších čtverců proloženy přímkou. Ze sklonu proložených přímek lze odhadnout, že je do sušičky přiváděné stejné množství páry v každém ze tří přípouštění páry. Pomocí této analýzy bylo množství přiváděné do výměníku odhadnuto na 1,3 kg. Jednotlivé vzorky dat s výslednou regresní analýzou jsou uvedeny na Obrázek 4-17.



Obrázek 4-17 Detail přípouštění páry

5. Difuzní model

Tato kapitola se věnuje dvou rozměrné analýze přestupu tepla a hmoty uvnitř válcového objektu, a to využitím metody konečných objemů. Princip modelování je založen na systému matematických rovnic, které popisují distribuci tepla a vlhkosti uvnitř objektu a umožňují poskytnout další informace k porozumění celého procesu sušení. Uvedené informace jsou převážně čerpány z literatury Incropera, Frank P. [11].

Cílem difuzního modelu je simulace sušícího procesu osově symetrického válce s využitím základních modelů vedení tepla a difuze vlhkosti. Difuzní model je také schopný předpovědět rozložení teplot a vlhkosti uvnitř vlhkého prádla.

5.1. Řídící rovnice a okrajové podmínky

V podkapitole 1.3, která pojednává o fyzikálních dějích odehrávajících se při sušení, stejně jako v jiných pasážích této práce, bylo několikrát uvedeno, že při sušení dochází ke sdílení tepla a hmoty (vlhkosti) se sušícím médiem. Z matematického hlediska jsou tyto dva děje řízeny druhým Fickovým zákonem (přenos hmoty; rovnice (5.1)) a Newtonovým ochlazovacím zákonem (přenos tepla mezi sušeným materiálem a sušícím médiem). V případě čistě difuzního modelu, na který je zaměřena tato kapitola, je namísto Newtonova ochlazovacího zákona jako druhá řídicí rovnice pro popis distribuce tepla uvnitř sušeného materiálu použita rovnice pro Fourierův zákon o vedení tepla (rovnice (5.2)). Pro rekapitulaci jsou obě zmíněné řídicí rovnice uvedeny níže ve vektorovém zápisu.

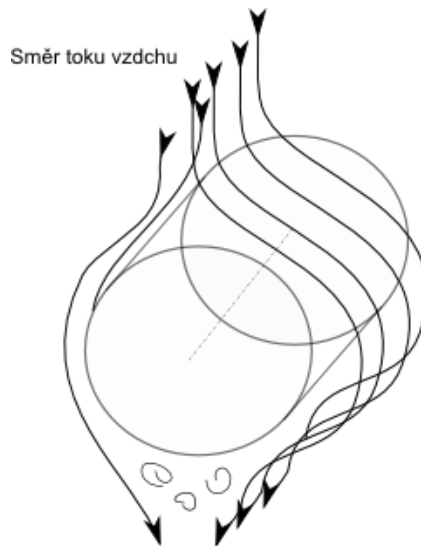
$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = D \nabla^2 \phi \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\lambda \nabla T \quad (5.2)$$

Sušený materiál je vkládán do bubnu sušičky, kde je následně sušen. Množství prádla, které je schopen buben pojmout v jedné vsázce je výrobcem stanoven na 24 kg. V případě této práce je ložná hmotnost sušeného materiálu 22,3 kg, což znamená vytíženost kapacity bubnu na 93,33 %. Z této procentuální vytíženosti kapacity bubnu lze předpokládat, že materiál zaujímá celý prostor válce. Tento hrubý předpoklad umožní řídicí rovnice difuzního modelu (5.1) a (5.2) převést z vektorového zápisu do souřadnicového. Geometrie sušeného materiálu tedy bude předpokládána jako válcovitá a řídicí rovnice následně převedena do cylindrických souřadnic (rovnice (5.3) a (5.4)), kde α_t značí termální difuzi. Interakce zvolené geometrie a vzduchu je vyobrazena níže na Obrázek 5-1. Rozměry válce jsou uvedeny v Tabulka 9.

$$\frac{1}{\alpha_t} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (5.3)$$

$$\frac{1}{D} \frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial X}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 X}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \quad (5.4)$$



Obrázek 5-1 Geometrie difuzního modelu

Matematické rovnice řídící proces sušení v této kapitole vyžadují vhodné zvolení okrajových a počátečních podmínek, jež byly zvoleny následovně:

A. Počáteční podmínky:

$$T(r; \varphi; z; 0) = T_i \quad (5.5)$$

$$X(r; \varphi; z; 0) = X_i \quad (5.6)$$

B. Okrajové podmínky:

Pro $r = 0$:

$$\frac{\partial T(0; \varphi; z; t)}{\partial r} = 0 \quad (5.7)$$

$$\frac{\partial X(0; \varphi; z; t)}{\partial r} = 0 \quad (5.8)$$

Pro $r = R$:

$$-\lambda \frac{\partial T(R; \varphi; z; t)}{\partial r} = \alpha \cdot (T_{air} - T) \quad (5.9)$$

$$-D \frac{\partial M(R; \varphi; z; t)}{\partial r} = k \cdot (x_{air} - X) \quad (5.10)$$

Pro $z = 0$:

$$-\lambda \frac{\partial T(r; \varphi; 0; t)}{\partial r} = \alpha \cdot (T_{air} - T) \quad (5.11)$$

$$-D \frac{\partial X(r; \varphi; 0; t)}{\partial r} = k \cdot (x_{air} - X) \quad (5.12)$$

Pro $z = L$:

$$-\lambda \frac{\partial T(r; \varphi; L; t)}{\partial r} = \alpha \cdot (T_{air} - T) \quad (5.13)$$

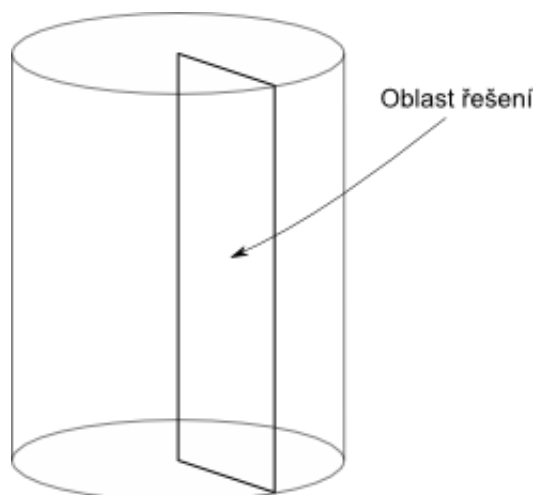
$$-D \frac{\partial X(r; \varphi; L; t)}{\partial r} = \alpha \cdot (x_{air} - X) \quad (5.14)$$

5.2. Geometrické a fyzikální předpoklady

Výše zmíněné řídicí rovnice čistě difuzního modelu jsou sepsány v cylindrických souřadnicích pro trojrozměrné válce, které jsou obtížně řešitelné. Válec jako takový je jednoduchý geometrický obrazec, který může být značně zjednodušen. Využitím azimutální a osové symetrie lze trojrozměrný problém převést na dvourozměrný problém. Oblast řešení difuzního modelu je vyobrazena níže na Obrázek 5-2. Zavedením tohoto geometrického předpokladu dojde ke značné simplifikaci řídicích rovnic. Převedené řídicí rovnice z cylindrických souřadnic do zjednodušeného 2D problému jsou potom:

$$\frac{1}{\alpha_t} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (5.15)$$

$$\frac{1}{D} \frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \quad (5.16)$$



Obrázek 5-2 Výsledná oblast řešení diferenciálních rovnic

Výše definované okrajové podmínky (rovnice (5.7) – (5.7)) pro řídicí rovnice v diferenciální formě jsou sepsány za předpokladu, že oblast zaujímaná prádlem (tedy válec) je ve statické rovnováze. Dále je také na rozdíl od transientního bilančního modelu uvedeném v kapitole 4 zanedbána jeho rotace. Stejně jako v případě zanedbání rotace, difuzní model vychází z podmínky veškerého pohlcení tepelného toku dodaným vzduchem, z čehož vyplývá, že nedochází k žádné tepelné ztrátě do bubnu a stěn pracovního prostoru. Stěny pracovního prostoru sušičky jsou od válce nekonečně vzdálené – nedochází k ovlivnění proudění okolo válce. Tento předpoklad umožňuje využít k řešení součinitelů přestupu tepla a hmoty vztahy podobnostních kritérií uvedené v kapitole 4.4. Pro jednodušší orientaci jsou zde rekapitulovány.

$$Re_D = \frac{\dot{V} \cdot D_{drum} \cdot \rho_{air}(T_{air})}{S_{in} \cdot \eta_{air}(T_f)} \quad (5.17)$$

$$\overline{Nu}_D = 0,3 + \frac{0,62 \cdot Re_D^{0,5} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}}{\left(1 + (0,4 \cdot Pr^{-1})^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{1}{4}}} \cdot \left(1 + \left(\frac{Re_D}{2,82 \cdot 10^5}\right)^{\frac{5}{8}}\right)^{\frac{4}{5}} \quad (5.18)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{\overline{Nu}_D \cdot \lambda_{air}(T_f)}{D_{drum}} \quad (5.19)$$

$$Le = \frac{\lambda_{air}(T_f)}{\rho_{air} \cdot c_{p_{air}}(T_f) \cdot D(T_f)} \quad (5.20)$$

$$\bar{k} = \frac{\bar{\alpha}}{\rho_{air} \cdot c_{p_{air}} \cdot Le^{\frac{2}{3}}} \quad (5.21)$$

Fyzikální omezení difuzního modelu jsou následující: [9]

- Konstantní termo-fyzikální vlastnosti vláken
- Zanedbatelné srážení nebo deformace vláken
- Nulová generace tepla uvnitř sušeného materiálu
- Difuze vlhkosti funkcí teploty prádla
- Konstantní teplota a průtok sušícího vzduchu
- 2D proměnná teplota a vlhkost uvnitř válcového objektu

Fyzikální vlastnosti vláken sušeného materiálu spolu s počátečními a okrajovými podmínkami jsou shrnuty v Tabulka 9.

Tabulka 9 Podmínky sušení a vlastnosti sušeného materiálu

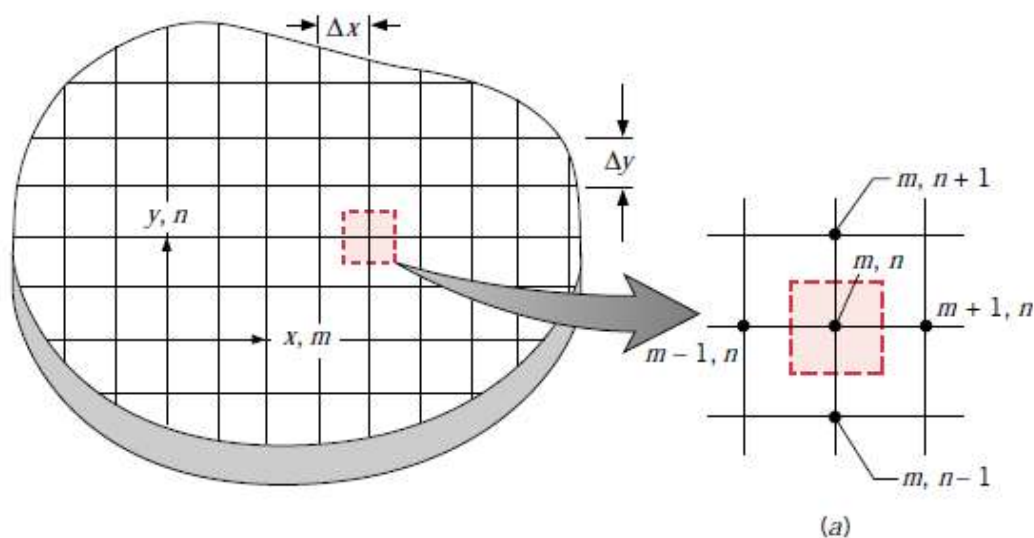
Rozměry [m]	R = 0,465 ; z = 0,78
Počáteční teplota prádla [°C]	20
Teplota sušícího vzduchu [°C]	70
Počáteční obsah vlhkost [%]	48,67
$c_{p_{cl}}$ [J/kg/K]	1,21
ρ_{cl} [kg/m ³]	1520
λ_{cl} [W/m/K]	0,03

5.3. Numerická implementace

Při opětovném předpokladu rovnice (5.15) popisující 2D vedení tepla a nahrazení souřadnice r , resp. z , obvyklými souřadnicemi pro 2D, tedy x , respektive y .

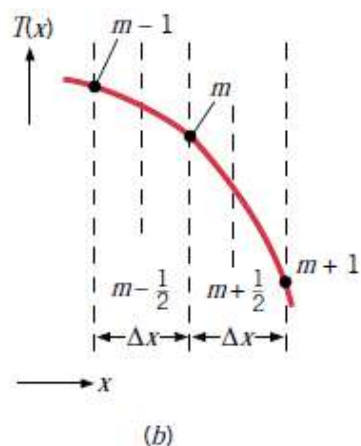
$$\frac{1}{\alpha_t} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (5.22)$$

Pro získání rovnice (5.22) v diskretizované formě lze využít aproximaci známou jako centrální diference. Diskretizace transientního systému vyžaduje nejen prostorovou diskretizaci, ale i diskretizaci v čase.



$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{m-1/2, n} = \frac{T_{m, n} - T_{m-1, n}}{\Delta x}$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{m+1/2, n} = \frac{T_{m+1, n} - T_{m, n}}{\Delta x}$$



Obrázek 5-3 2D vedení tepla - a) Síť buněk; b) aproximace konečnými prvky (převzato z [11])

Pro popis umístění diskretizovaných uzlů v prostoru jsou použity celočíselné dolní indexy m pro x -ové souřadnice a n pro y -ové souřadnice. Pro diskretizace v čase je použit celočíselný horní index p . Index $(p+1)$ označuje novou hodnotu teploty T v čase a index p hodnotu v čase předchozím. U souřadnicového indexování diskretizovaných uzlů index $(m+1)$ značí východně umístěný uzel od m, n -tého uzlu a index $(n+1)$ znamená severně vzdálený uzel od m, n -tého. Analogické značení platí pro indexy $(m-1)$ a $(n-1)$.

$$x = m \cdot \Delta x \quad (5.23)$$

$$y = n \cdot \Delta y \quad (5.24)$$

$$t = p \cdot \Delta t \quad (5.25)$$

Hodnota druhé derivace teploty podle x v uzlu (m,n) může být podle Obrázek 5-3 vyčíslena jako:

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right|_{m,n} \approx \frac{\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{m+1/2,n} - \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{m-1/2,n}}{\Delta x} \quad (5.26)$$

Teplotní gradienty mohou být vyjádřeny jako funkce teplot v patřičných buňkách.

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{m+1/2,n} \approx \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad (5.27)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{m-1/2,n} \approx \frac{T_{m,n} - T_{m-1,n}}{\Delta x} \quad (5.28)$$

Dosazením rovnice (5.27) a (5.28) do rovnice (5.26) a malé úpravě je pak:

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right|_{m,n} \approx \frac{T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 2T_{m,n}}{(\Delta x)^2} \quad (5.29)$$

Analogicky pro druhou derivaci teploty podle y .

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right|_{m,n} \approx \frac{\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{m,n+1/2} - \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{m,n-1/2}}{\Delta y} \quad (5.30)$$

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right|_{m,n} \approx \frac{T_{m,n+1} + T_{m,n-1} - 2T_{m,n}}{(\Delta y)^2} \quad (5.31)$$

Dopředná diskretizace v čase pomocí aproximace konečnými objemy je vyjádřena následovně:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{m,n} \approx \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} \quad (5.32)$$

Dosazením odvozených rovnic (5.29), (5.31) a (5.32) do rovnice (5.22) přejde 2D vedení tepla v diferenciální formě do formy diskretizované. Diskretizovaná rovnice nestacionárního 2D vedení tepla je uvedena níže (rovnice (5.33)).

$$\frac{1}{\alpha_t} \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} = \frac{T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 2T_{m,n}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{m,n+1} + T_{m,n-1} - 2T_{m,n}}{(\Delta y)^2} \quad (5.33)$$

Využitím ekvidistantního dělení ($\Delta x = \Delta y$) při prostorové diskretizaci řešené oblasti lze teplotu v uzlu (m,n) v čase (p+1) řešit jako:

$$T_{m,n}^{p+1} = Fo(T_{m+1,n}^p + T_{m-1,n}^p + T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p) + (1 - 4Fo)T_{m,n}^p \quad (5.34)$$

kde Fo je Furierovo číslo pro aproximaci konečnými prvky. [11]

$$Fo = \frac{\alpha_t \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2} \quad (5.35)$$

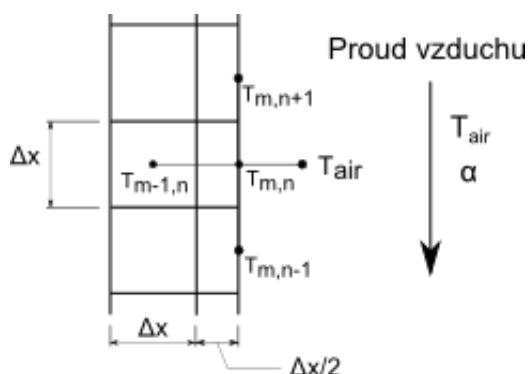
Rovnice (5.34) platná pro vnitřní diskretizované uzly v řešené oblasti je explicitní, neboť neznámé hodnoty teplot uzlů v čase (p+1) jsou vyjádřeny výhradně z hodnot teplot v čase p. Jakmile jsou známy hodnoty teplot v čase $t = 0$ ($p = 0$) z počátečních podmínek, výpočet začne v čase $t = \Delta t$ ($p = 1$), se známými hodnotami teplot pro každý uzel v čase $t = t$ ($p = 1$), výpočet pokračuje pro další hodnoty teplot v čase $t = 2\Delta t$ ($p = 2$). V této metodě je teplota získána postupným krokovaním v čase o interval Δt .

Výsledné řešení explicitní metodou může být charakterizováno numerickou oscilací, která je fyzikálně nemožná. Oscilace se může být nestabilní. Tato nestabilita může způsobovat divergenci řešení. K zajištění předejití takovéto chyby musí přírůstek v čase Δt splňovat jisté limity závislé na hodnotě Δx a dalších parametrech systému. Tento předpoklad je označován jako kritérium stability, které může být získáno matematicky nebo demonstrováno pomocí termodynamických principů. [11] Pro vnitřní buňky 2D systému v rovnici (5.34) může být horní hodnota časového kroku vyjádřena jako: [11]

$$(1 - 4Fo) \geq 0 \quad (5.36)$$

$$Fo \leq \frac{1}{4} \quad (5.37)$$

Zde uvedeným postupem byla získána rovnice pro vedení (distribuci) tepla prádla pro diskretizované vnitřní objemy. Teploty v diskretizovaných uzlech na hranici oblasti jsou obdrženy energetickou bilancí pro daný uzel. Energetická bilance je podmíněna nárůstem energie směrem k uzlu ze všech okolních objemů. Síťování plochy na hranicích řešené plochy lze vidět na Obrázek 5-4.



Obrázek 5-4 Síťování plochy na hranici oblasti

Do zkoumaného (m,n)-tého uzlu na hranici oblasti tepelná energie vstupuje od severního, západního a jižního sousedícího uzlu formou vedení v materiálu. Východní stranou, kde dochází k interakci mezi povrchem materiálu a proudícím sušicím médiem, je energie dodávána formou konvekce. Matematický zápis pro tepelný tok do uzlu je pak:

$$\dot{Q}_{kond,W} + \dot{Q}_{kond,S} + \dot{Q}_{kond,N} + \dot{Q}_{konv,E} = \dot{Q}_{ac} \quad (5.38)$$

kde $\dot{Q}_{kond,W}$ značí dodaný tepelný tok ze západní buňky, $\dot{Q}_{kond,S}$ z jižní buňky, $\dot{Q}_{kond,N}$ ze severní buňky a $\dot{Q}_{konv,E}$ je dodaný tepelný tok od proudícího média konvekcí. Rozepsané dílčí tepelné toky v rovnici (5.38) jsou uvedeny v rovnici (5.39)

$$\begin{aligned} & \frac{\lambda_{cl}A}{\Delta x}(T_{m-1,n}^p - T_{m,n}^p) + \frac{\lambda_{cl}A}{\Delta x}(T_{m,n-1}^p - T_{m,n}^p) + \frac{\lambda_{cl}A}{\Delta x}(T_{m,n+1}^p - T_{m,n}^p) + \\ & + \alpha A(T_{air} - T_{m,n}^p) = \rho_{cl}c p_{cl}A \frac{\Delta x}{2} \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} \end{aligned} \quad (5.39)$$

Úpravou rovnice (5.39) a substitucí rovnice (5.35) a (5.40), kde Bi je Biotovo číslo pro aproximaci metodou konečných objemů, a následným vyjádřením teploty v čase (p+1) je pak rovnice (5.41). [11]

$$Bi = \frac{\alpha \Delta x}{\lambda} \quad (5.40)$$

$$T_{m,n}^{p+1} = Fo(2T_{m-1,n}^p + T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p + 2BiT_{air}) + (1 - 4Fo - 4BiFo)T_{m,n}^p \quad (5.41)$$

Vztah pro teplotu v uzlech na ose symetrie lze získat z rovnice (5.41) prostým položením Biotova čísla nule. Výsledná teplota v čase (p+1) pro tyto uzly je pak:

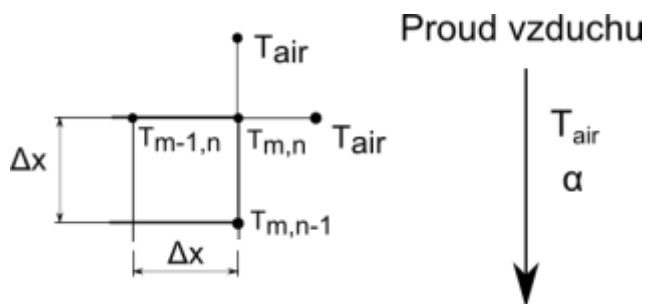
$$T_{m,n}^{p+1} = Fo(2T_{m-1,n}^p + T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p) + (1 - 4Fo)T_{m,n}^p \quad (5.42)$$

Kritérium stability pro použití rovnice (5.41), respektive (5.42) je uvedeno v rovnici (5.43), respektive (5.44). [11]

$$Fo(2 + Bi) \leq \frac{1}{2} \quad (5.43)$$

$$Fo \leq 1 \quad (5.44)$$

Analogickým postupem popsaným výše jsou určeny teploty v novém čase (p+1) pro uzly v rozích na hranici oblasti (viz Obrázek 5-5).

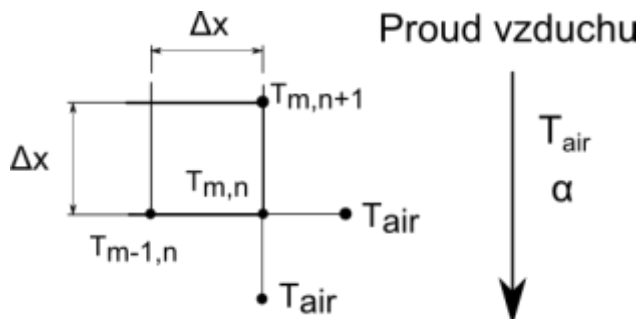


Obrázek 5-5 Uzel v pravém horním rohu oblasti

$$T_{m,n}^{p+1} = 2Fo(T_{m-1,n}^p + T_{m,n-1}^p + 2BiT_{air}) + (1 - 4Fo - 4BiFo)T_{m,n}^p \quad (5.45)$$

Pro pravý dolní roh (viz Obrázek 5-6) oblasti pak platí rovnice (5.46)

$$T_{m,n}^{p+1} = 2Fo(T_{m-1,n}^p + T_{m,n+1}^p + 2BiT_{air}) + (1 - 4Fo - 4BiFo)T_{m,n}^p \quad (5.46)$$



Obrázek 5-6 Pravý dolní roh oblasti

Diskretizaci řídicí rovnice pro distribuci vlhkosti lze provést dvojím způsobem. První způsob je analogický s postupem diskretizace řídicí rovnice pro vedení tepla, tedy s využitím materiálové bilance v jednotlivých uzlech. Druhý, daleko efektivnější způsob, je využití korespondence mezi přenosem tepla a přenosem vlhkosti publikovaným v Incropera, Frank, P.. [11]

Tabulka 10 Korespondence mezi přestupem tepla a hmoty

Přenos tepla	Přenos hmoty
$Fo = \frac{\alpha_t \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2}$	$Fo_m = \frac{D \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2}$
$Bi = \frac{\alpha \cdot \Delta x}{\lambda}$	$Bi_m = \frac{k \cdot \Delta x}{D}$

Distribuce vlhkosti pro vnitřní uzly řešené oblasti je tedy:

$$X_{m,n}^{p+1} = Fo_m(X_{m+1,n}^p + X_{m-1,n}^p + X_{m,n+1}^p + X_{m,n-1}^p) + (1 - 4Fo_m)X_{m,n}^p \quad (5.47)$$

Uzly na hranici a ose symetrie:

$$X_{m,n}^{p+1} = Fo_m(2X_{m-1,n}^p + X_{m,n+1}^p + X_{m,n-1}^p + 2Bi_m X_{air}) + (1 - 4Fo_m - 4Bi_m Fo_m)X_{m,n}^p \quad (5.48)$$

$$X_{m,n}^{p+1} = Fo_m(2X_{m-1,n}^p + X_{m,n+1}^p + X_{m,n-1}^p) + (1 - 4Fo_m)X_{m,n}^p \quad (5.49)$$

Pravý horní roh řešené oblasti:

$$X_{m,n}^{p+1} = 2Fo_m(X_{m-1,n}^p + X_{m,n-1}^p + 2Bi_m X_{air}) + (1 - 4Fo_m - 4Bi_m Fo_m)X_{m,n}^p \quad (5.50)$$

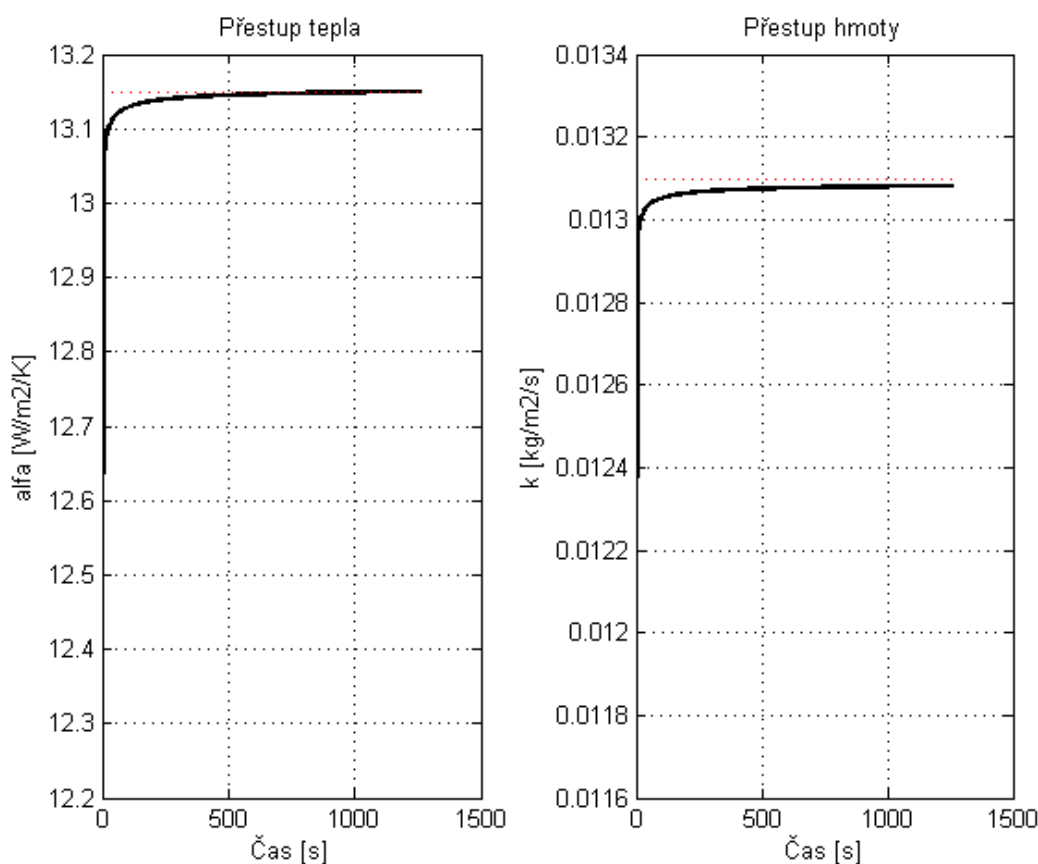
Pravý dolní roh oblasti:

$$X_{m,n}^{p+1} = 2Fo_m(X_{m-1,n}^p + X_{m,n+1}^p + 2Bi_m X_{air}) + (1 - 4Fo_m - 4Bi_m Fo_m)X_{m,n}^p \quad (5.51)$$

Systémem sestavených rovnic pro vedení tepla v sušeném materiálu a distribuci vlhkosti uvnitř materiálu byla provedena transientní simulace difuzního modelu s časovým krokem 0,2 s, jejichž výsledky jsou uvedeny níže v podkapitole 5.4.

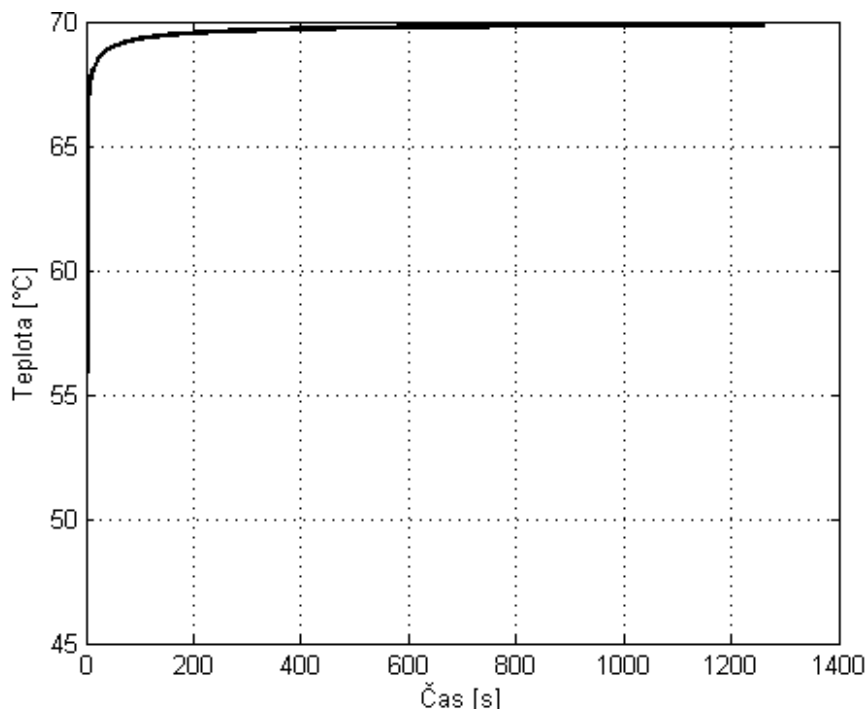
5.4. Interpretace výsledků

V prvních fázích procesu sušení prádla je evidentní značný nárůst hodnot součinitelů α a k . Nárůst způsobuje velký gradient rozdílných teplot a obsahu vlhkosti na povrchu prádla, jehož velikost určuje rychlost sušení prádla. Z Obrázek 5-7 níže je zřejmý průběh gradientu přestupu tepla a hmoty. Na počátku dochází ke značnému přenosu těchto dvou sledovaných veličin. S postupným krokováním v čase o hodnotu intervalu Δt dochází ke snižování gradientu. Snižování hodnot gradientu se projeví ve zpomalení procesu, až řešení transientní simulace přejde v ustálené, kdy se změna gradientu je v čase téměř nulová.



Obrázek 5-7 Průběh součinitele α a k pro čistě difuzní model

Snižování gradientu je způsobeno volbou výpočtu součinitelů α a k , které jsou funkcí fyzikálních veličin sušícího média. Hodnoty fyzikálních veličin vstupující do výpočtů těchto dvou součinitelů byly počítány pro teplotu fázového rozhraní mezi prádlem a sušícím médiem, jenž je vypočtena průměrováním hodnot teploty povrchu prádla a teploty vzduchu. Průběh teploty fázového rozhraní je na Obrázek 5-8.

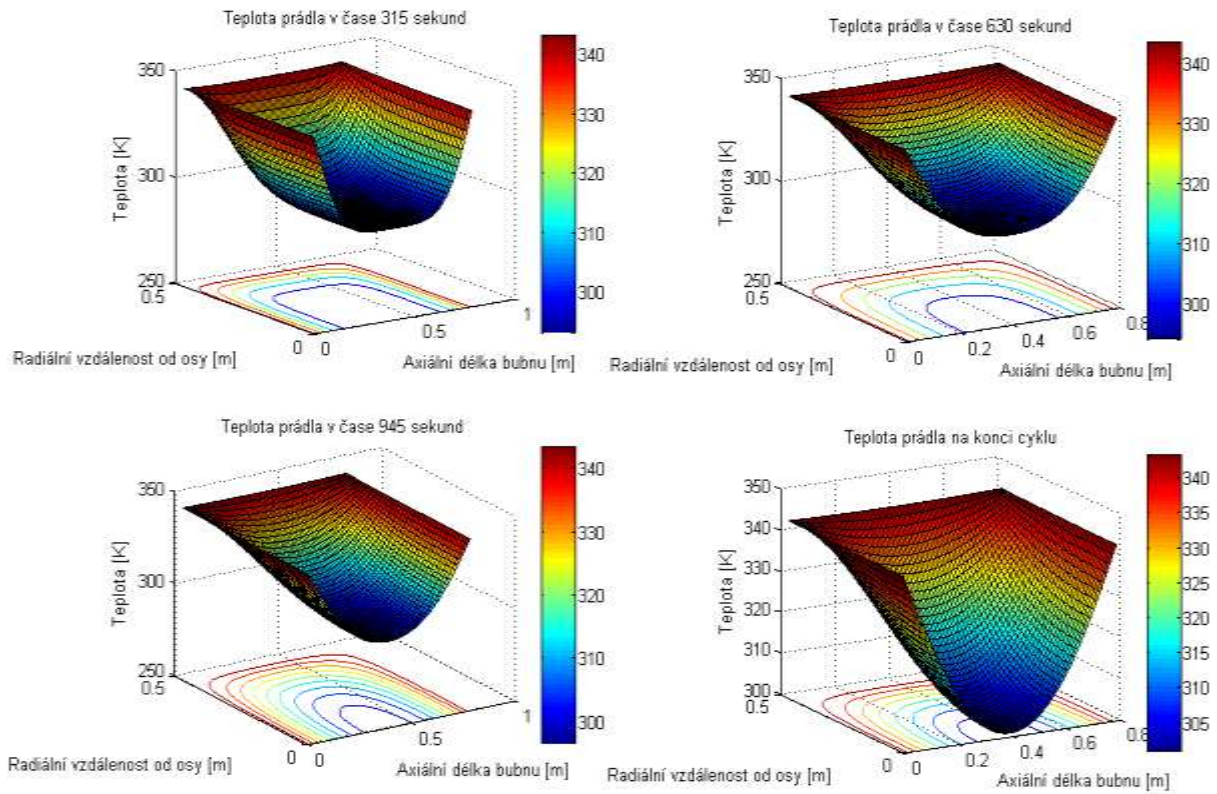


Obrázek 5-8 Průběh teploty fázového rozhraní v čase

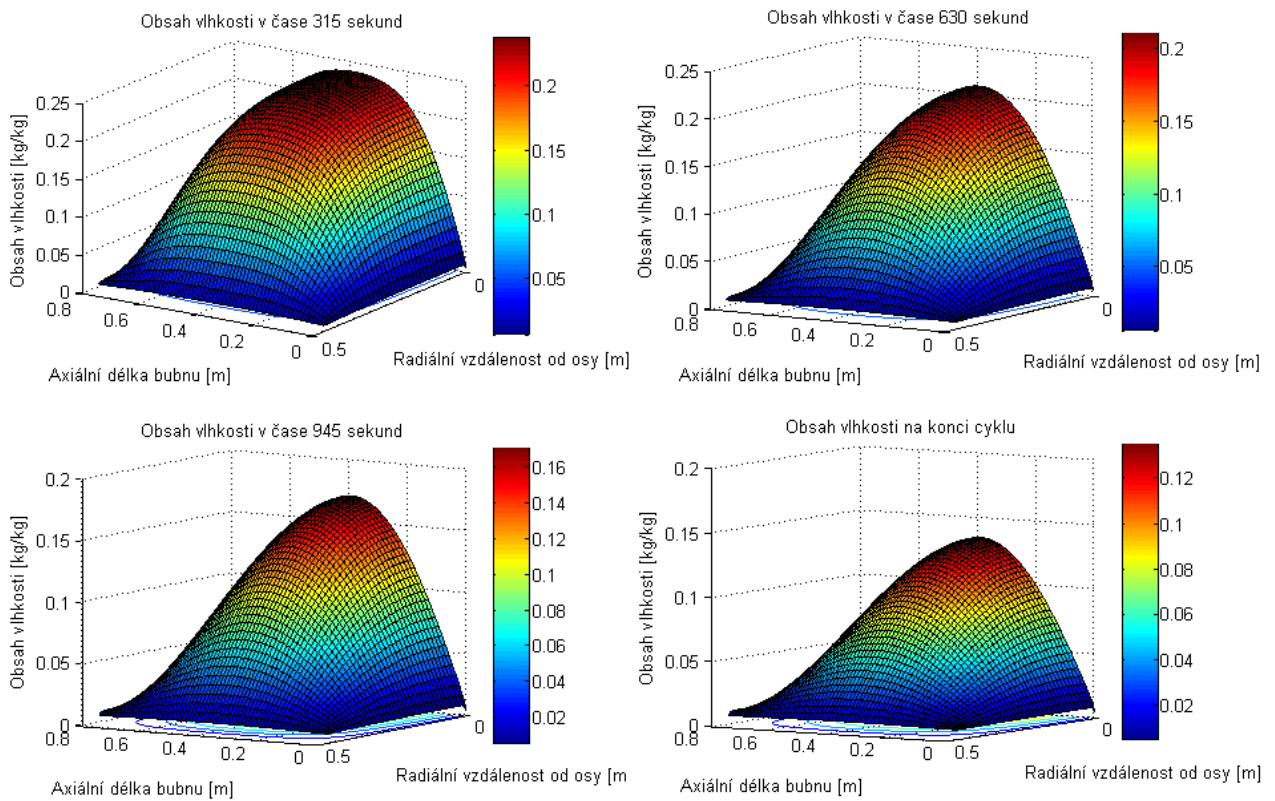
5.4.1. Rozložení teploty a vlhkosti v prádle

Z rozložení teploty prádla v čase uvedeném na Obrázek 5-9 níže pro difuzní model je patrný rychlý nárůst povrchové teploty prádla v rané fázi sušícího procesu. Teplota na povrchu, v době kdy nastává ustálení teplotního gradientu, je v rovnováze s teplotou sušícího média. Toto vyrovnání má za následek snížení teplotního toku do prádla, jenž se projeví ve zpomalení prostupu tepla dovnitř prostoru zaujímaného prádlem. Zvyšování teploty prádla uvnitř jím zaujímaným objemem v pozdější fázi pozvolné. Na konci sušícího cyklu nedojde k ohřevu vláken, které jsou umístěny ve středu bubnu. Důležité je zmínit, že v tomto difuzním modelu byla rotace zanedbána. V případě rotace dojde k nárůstu teplot vnitřních vláken vlivem převalování prádla v bubnu způsobeným žebry a jeho rotací. Nárůst teplot vnitřních vláken však nebude v porovnání s teplotou vláken na povrchu umístěného prádla tak výrazný vlivem závislosti pohybu prádla uvnitř bubnu na ložné hmotnosti (viz podkapitola 3.3.3).

Porovnáním Obrázek 5-10, na kterém je vyobrazeno rozložení obsahu vlhkosti v prádle, s Obrázek 5-9 je vidět zjevná korelace mezi distribucí tepla a hmoty uvnitř prádla. Stejně jako v případě teploty dochází k rychlému úbytku vlhkosti ve vláknem na povrchu v brzkém stádiu procesu sušení. V pozdější fázi je vytahována vlhkost z vláken, které se nachází uvnitř válce na povrch, aby mohlo dojít k jejímu odvodu. Z rozložení vlhkosti v prádle na konci cyklu na Obrázek 5-10 vyplývá, že na konci cyklu jsou vlákna na povrchu de facto zbavená veškeré vlhkosti v nich obsažené. K úbytku vlhkosti lokalizované ve vnitřních vlákních v průběhu celého cyklu dojde pouze nepatrně a prádlo ve středu bubnu je po ukončení cyklu stále vlhké.



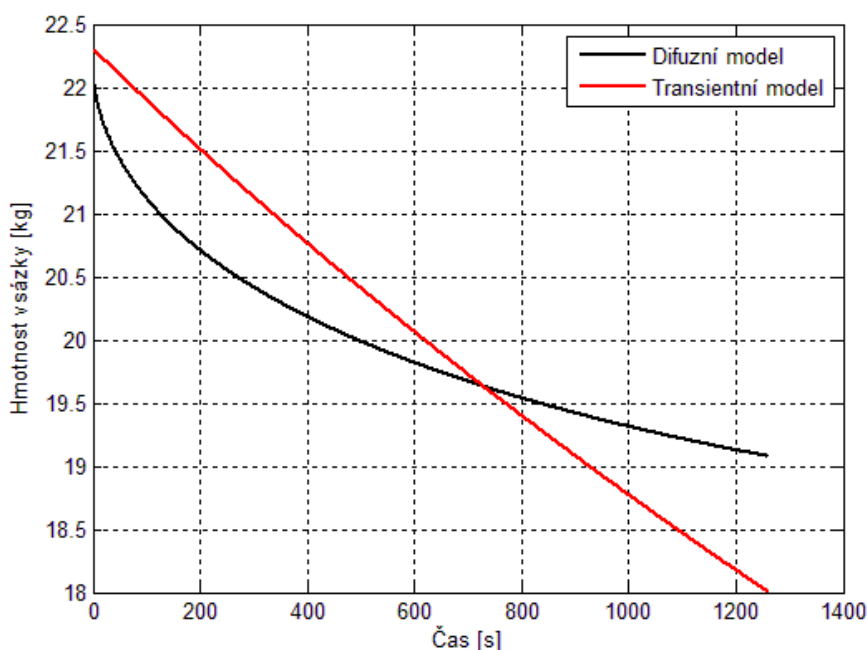
Obrázek 5-9 Rozložení teploty prádla v čase



Obrázek 5-10 Rozložení vlhkosti v prádle v závislosti na čase

5.4.2. Úbytek hmotnosti vsázky

Křivka popisující úbytek hmotnosti vsázky získaná ze simulace difuzního modelu vykazuje logaritmický charakter. Tento logaritmický průběh způsobuje klesající gradientu vlhkosti mezi povrchem prádla a sušícím médiem. Na začátku je rozdíl mezi obsahem vlhkosti na povrchu prádla a vzduchu, jenž se projeví rychlým odvodem povrchové vlhkosti do sušícího média. V pozdějším stádiu sušícího procesu dochází ke snižování gradientu způsobující odvod vlhkosti z prádla. Toto stádium se charakterizuje odváděním vlhkosti z vláken ležících ve středu bubnu, a tudíž dochází i ke snížení rychlosti jejího odvodu na povrch a následné odtažení sušícím médiem z prádla. Porovnáním křivky průběhu úbytku hmotnosti vsázky z transienční bilance s křivkou získanou z difuzního modelu je zjevné, že sušení čistě difuzním modelem by trvalo daleko delší dobu než u transienčního modelu. Na konci cyklu, kdy podle difuzního modelu, jsou v prádle obsaženy stále 4 kg vody, což je zhruba o jeden kilogram více v porovnání s provedeným experimentem a transienční simulací.



Obrázek 5-11 Porovnání průběhu hmotnosti pro difuzní a transienční model

6. Analýza proudění uvnitř pracovního prostoru bubnové sušičky

Tato kapitola se zabývá tvorbou geometrie a výpočetní sítě pro analýzu proudění média a tvorby zkratových proudů zejména v okolí rotujícího bubnu studované sušičky T24. Pro realizaci CFD simulace byly použity softwary Gambit 2.4.6 a Ansys Fluent 14.5.

6.1. Virtuální geometrie bubnu

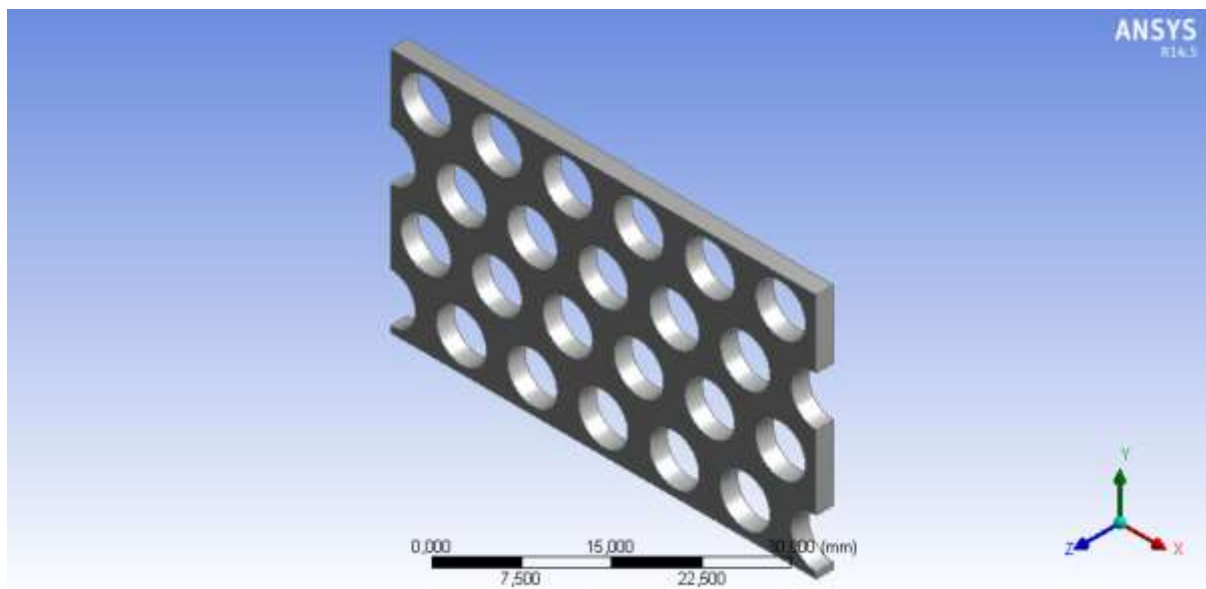
Geometrie pracovního prostoru je koncipována jako dva koaxiální válce, z nichž vnitřní válec je rotující (perforovaný buben) a druhý je statický (stěny pracovního prostoru). Stěny vymezující pracovní prostor sušičky jsou umístěné blízko rotujícímu válci, z čehož lze předpokládat ovlivnění proudícího vzduchu rotací bubnu. Kvantitativním posouzením podmínek nastávajících uvnitř pracovního prostoru lze usoudit, že vektor úhlové rychlosti rotujícího bubnu ovlivňuje směr proudění vzduchu. Pokud je směr úhlové rychlosti rovnoběžný s vektorem proudění média, vzduch je urychlován ve směru jeho proudění. Jakmile úhlová rychlost rotace bubnu dosáhne bodu inflace (bod, ve kterém druhá derivace rychlosti mění své znaménko, čímž dochází ke změně směru), jsou si směry proudění vzduchu a rotace navzájem protiběžné. V tomto případě je rotací bubnu generován odpor proudícímu vzduchu a jeho část nuceně mění směr proudění, čímž dojde k jeho zacyklení a nerovnoměrnosti toku v obtokovém kanálu. Relativní změna polohy děr vůči proudícímu médiu spolu s nerovnoměrným prouděním vzduchu v okolí perforovaného bubnu má za následek proměnný průtok dovnitř bubnu.

Buben samotný je de facto tenkostěnný válec s tloušťkou stěny 2 mm o délce 780 mm se značným počtem kruhových děr v jeho stěnách. Takováto geometrie je pro adekvátní analýzu velice komplexní a tvorba sítě značně náročná. Pro takto simulovaný objekt je množství diskretizovaných buněk neúnosně velké a vede ke značné náročnosti na výpočetní techniku a výpočtový čas. Je tedy žádoucí nahradit tuto komplexní geometrii jednodušší, která sníží náročnost celého objektu. Detail perforovaného bubnu je uveden na Obrázek 6-1.



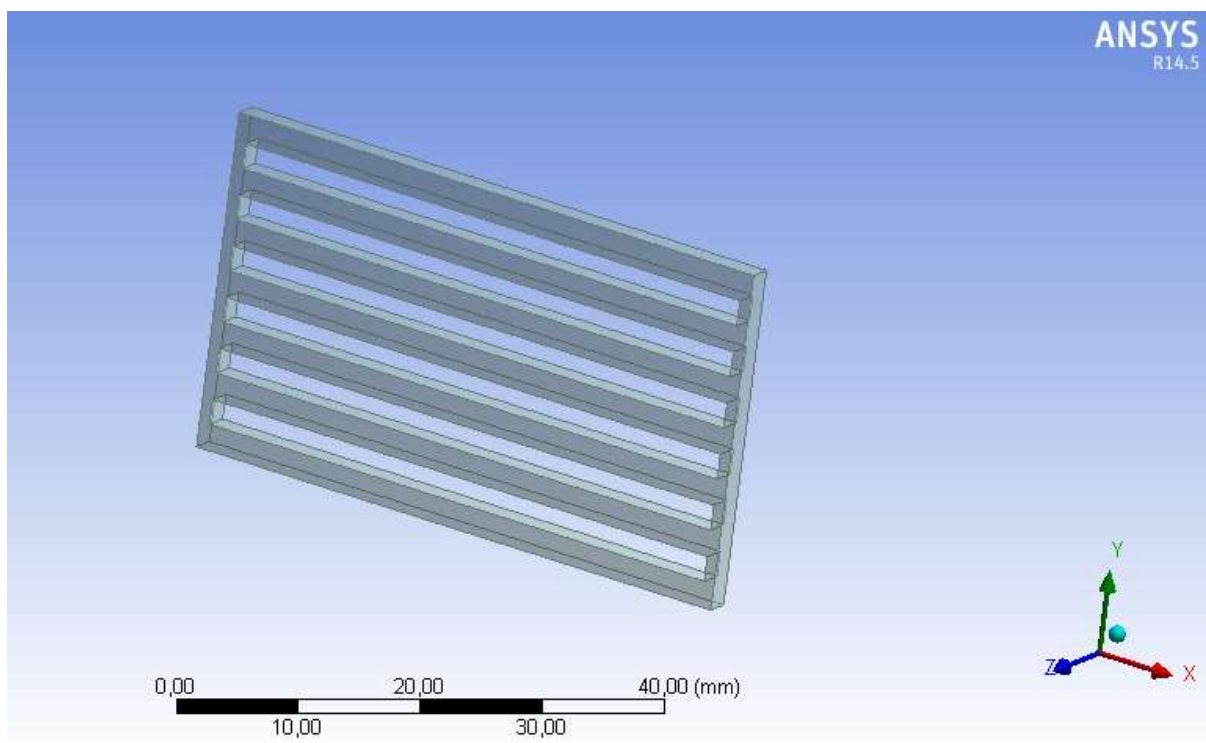
Obrázek 6-1 Detail perforovaného bubnu

Nosnou myšlenkou snížení komplexnosti geometrie bubnu je nahradit kruhové perforace bubnu jinými geometrickými útvary, které svým charakterem poskytují jednodušší metodiku při jejich diskretizaci, a zároveň snížit počet perforací při zachování tlakové ztráty původní geometrie. Pro vyčíslení tlakové ztráty původní geometrie byl z válce vybrán vzorek, na kterém byla provedena simulace za předpokladu, že tlaková ztráta roste s velikostí vzorku lineárně. Jinými slovy, zvětšením nahrazené geometrie n -krát jeho tlaková ztráta n -krát vzroste. Odebraný vzorek je uveden na Obrázek 6-2.



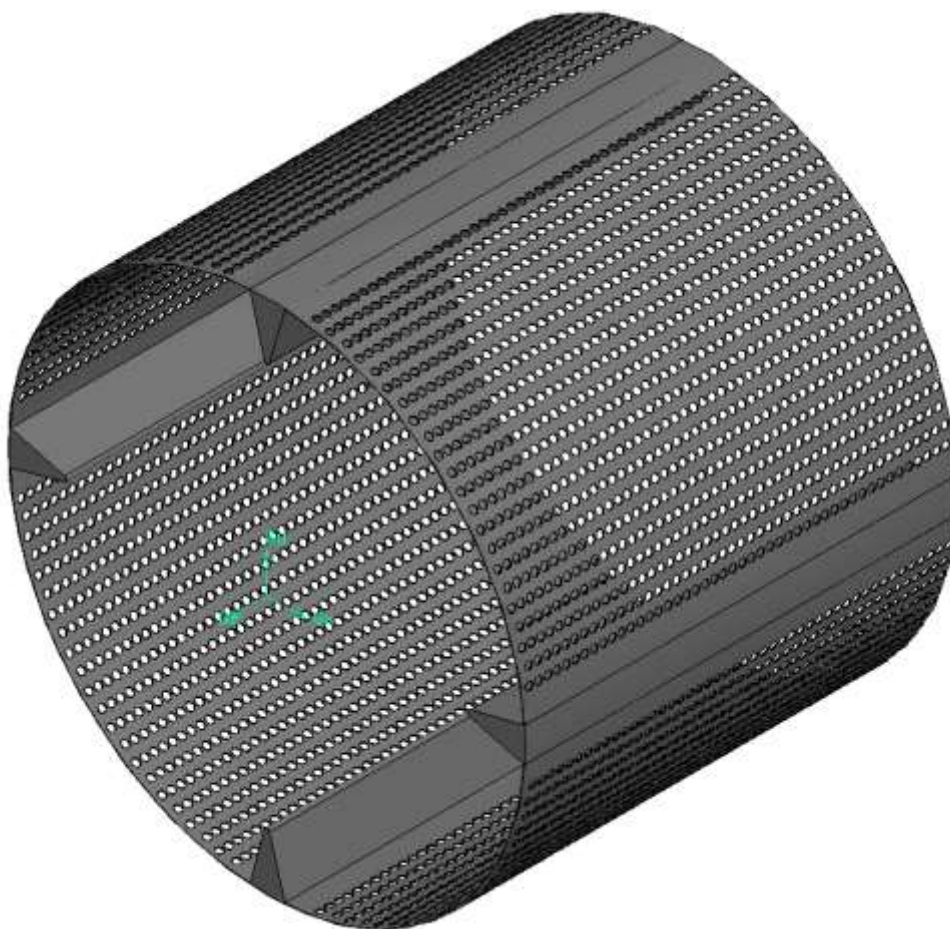
Obrázek 6-2 Vzorek pro určení tlakové ztráty původní geometrie

Uvažovaný způsob náhrady perforace virtuálního bubnu je uveden na Obrázek 6-3.



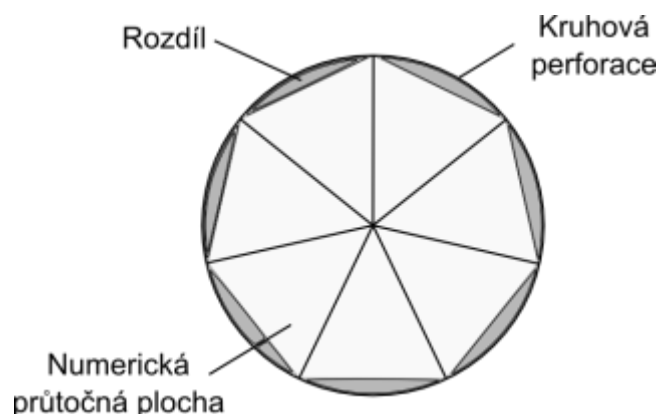
Obrázek 6-3 Náhrada původní geometrie

Náhrada kruhových perforací obdélníkovými tvary přináší výhodu ve snížení počtu děr ve virtuální geometrii bubnu při zachování průtočné plochy. Na druhou stranu, jejich významnou nevýhodou je razantní změna charakteru proudění vzduchu dovnitř bubnu. Z tohoto důvodu byla tato aproximace perforování zamítnuta pro další analýzy. Jako další možnost náhrady reálné geometrie byly vzaty v potaz čtvercové díry. Výhodou čtvercové perforace je menší odlišnost od charakteru proudění kruhovými děrami než v případě obdélníkových tvarů. Avšak nejsou s nimi spojeny žádné benefity, co se do počtu děr týče. Vzhledem k těmto faktům byla pro finální aproximaci zvolena poslední varianta, kterou je zachování kruhového tvaru perforování, čímž nedojde k porušení charakteru proudění kruhovými děrami. Počet děr však byl snížen na čtvrtinu při dvojnásobném zvětšení jejich průměru, aby došlo k zachování průtočné plochy. Virtuální model bubnu je uveden na Obrázek 6-4.



Obrázek 6-4 *Virtuální geometrie bubnu*

Při vytváření sítě aproximované perforace virtuálního bubnu docházelo ke značnému nárůstu počtu buněk, tudíž byly kruhové díry síťovány jako vepsaný sedmiúhelník. Tímto finálním síťováním došlo ke snížení průtočné plochy přibližně o 14,8 %. Výsledná průtočná plocha je uvedena níže na Obrázek 6-5 v porovnání s aproximovanou kruhovou perforací. Souhrnné informace o původní geometrii a virtuální jsou shrnuty v Tabulka 11.



Obrázek 6-5 Vizualizace numerické průtočné plochy bubnem

Tabulka 11 Porovnání virtuální a skutečné geometrie bubnu

-	Tloušťka stěny [mm]	Délka bubnu [mm]	Průměr bubnu [mm]	Počet děr	Průměr díry [mm]	Průtočná plocha [mm ²]
Původní geometrie	2	780	930	31680	6,5	1,05·10 ⁶
Virtuální geometrie	2	780	930	7910	13	0,91·10 ⁶

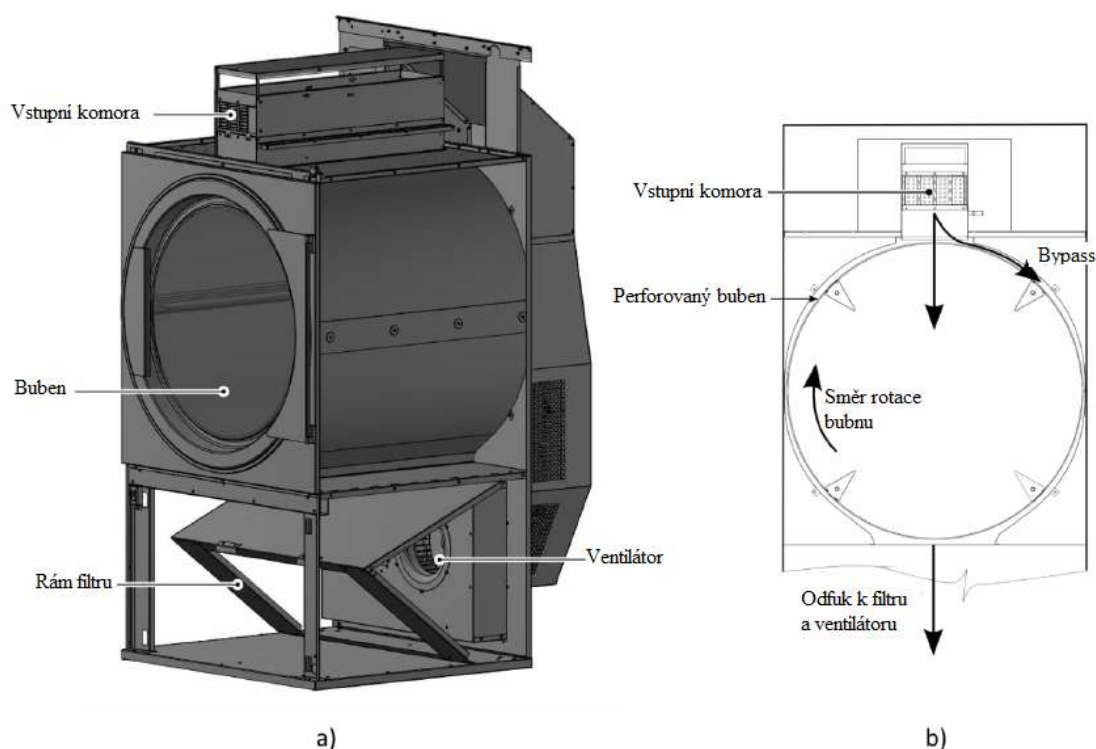
6.2. Výpočetní oblast a okrajové podmínky

Prvním krokem u simulace proudění tekutin využitím CFD analýzy je formulace řešené oblasti. Průtok sušícího média je limitován povahou posuzované oblasti. Prvky omezující proudění média uvnitř sušičky jsou stěny pracovního prostoru válce, buben a odtoková část dopravující vzduch k filtru pevných částic. Prostorová diskretizace u velkých oblastí bývá často kompromisem mezi přesností výpočtu a výpočtovým časem. Přesné výpočty vyžadují jemnější síť, což se projeví ve větším počtu buněk a významným nárůstem výpočetního času. V případě hrubší sítě je výpočtový čas nižší, a spolu s výpočtovým časem klesá i přesnost výpočtu.

Volba vstupní okrajové podmínky má zásadní vliv na rozložení vektorového pole rychlosti proudění. Vzduch je na nasáván do bubnové sušičky několika otvory ve vstupní komoře (viz Obrázek 2-3), u nichž zjevně nedochází k rovnoměrnému rozložení hmotnostního toku. Jak vzduch proudí komorou ke vstupnímu otvoru do pracovního prostoru bubnové sušičky lze předpokládat ustálení toku. Jakmile vzduch dosáhne vstupního otvoru, dostává se do oblasti, kde je předpokládáno ovlivnění jeho proudění a může dojít k částečnému zpětnému toku do vstupní komory. K podobnému závěru ve své práci došel i Čermák. [4] Vstupní komorou se již detailněji zabývá zmíněný Čermák ve své diplomové práci, a proto je v této zanedbána. Vstupní okrajovou podmínkou je v této práci zvolen hmotnostní průtok přiváděcího otvoru do pracovního práce, což zajistí rovnoměrné rozložení vektorového pole a zpětný tok je odstraněn.

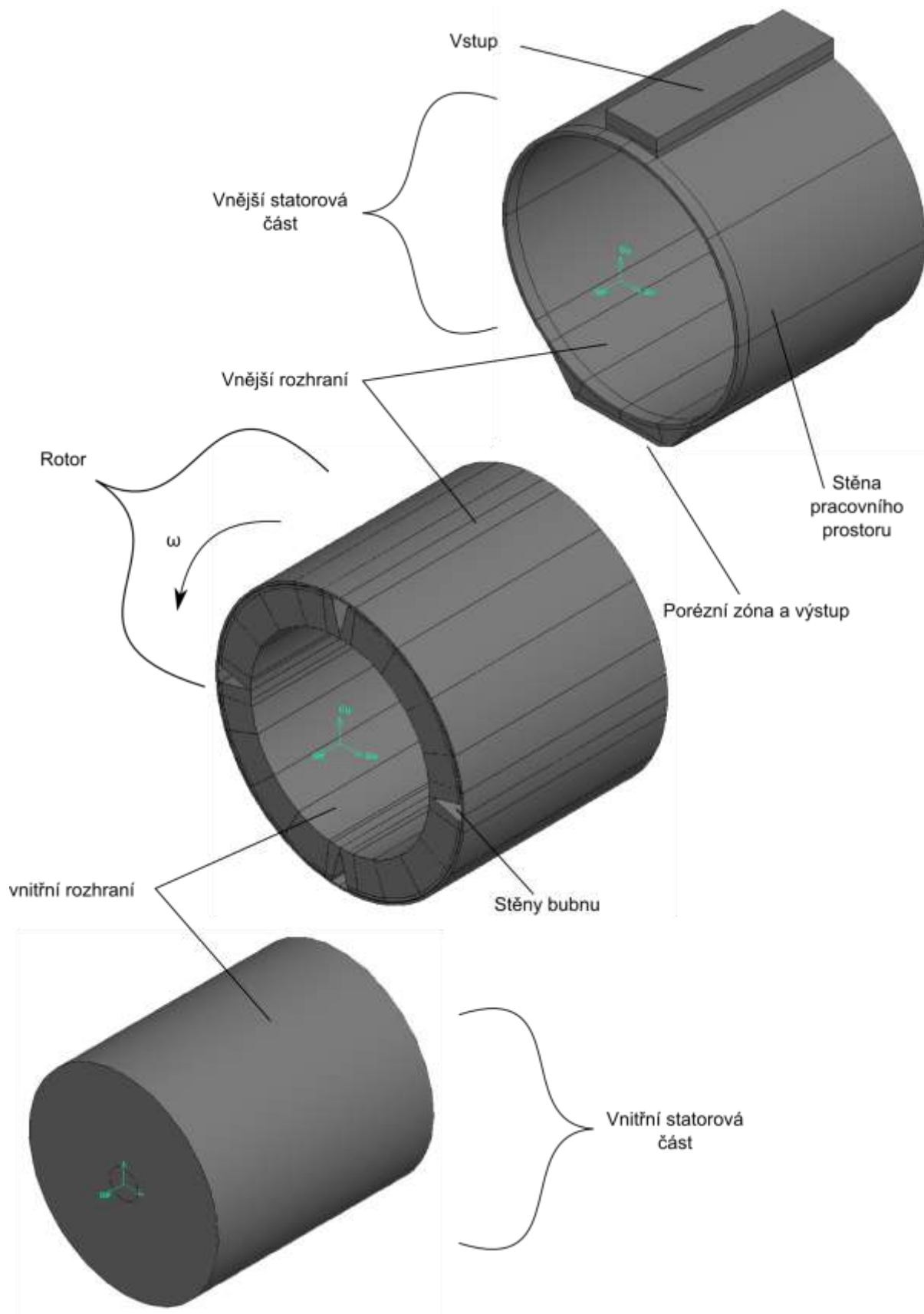
Stěžejní částí geometrie této analýzy je správné definování pracovního prostoru bubnové sušičky. V tomto pracovním prostoru dominuje rotující bubna. Ansys Fluent umožňuje řešit výpočetní oblast s rotujícím prvkem rozdělením oblasti na statickou a rotující podoblast, mezi něž je umístěno rozhraní umožňující vzájemnou interakci tekutiny statorové a rotorové podoblasti. Rotující podoblast se skládá výhradně z geometrie virtuálního bubnu popsáním v předchozí podkapitole. Velikost úhlové rychlosti této podoblasti je shodná s úhlovou rychlostí bubnu. Zahrnutí diskretizace tloušťky stěny bubnu do výpočtové oblasti by mělo za následek značný nárůst počtu buněk. Vzhledem k tomuto faktu byla geometrie bubnu z rotorové části odečtena a nahrazena okrajovou podmínkou typu stěna. Strhávání vzduchu proudícího okolo bubnu částečně ovlivňuje i drsnost jeho povrchu. Zahrnutá velikost nerovnoměrností povrchu stěny bubnu odpovídá hodnotě $Ra\ 0,8$ pro leštěné materiály.

Vzduch je odváděn z pracovního prostoru do odfukové části směrem k filtru pevných částic. Detail odfukové části je uveden na Obrázek 6-6 a). Z geometrické koncepce odfukové části je patrné, že nedochází k ustálení na výstupní okrajové podmínce, která byla zvolena jako odvod tlaku (pressure outlet). Neustálené proudění v okolí okrajové podmínky způsobuje zpětný tok do výpočtové oblasti, jenž se může projevit na nepřesnostech dosažených výsledků. Z tohoto důvodu byla do okolí okrajové podmínky přidána porézní zóna, která zvětší tlakovou ztrátu, čímž dojde ke stabilizaci toku.



Obrázek 6-6 Detail odfukové části (převzato z [4])

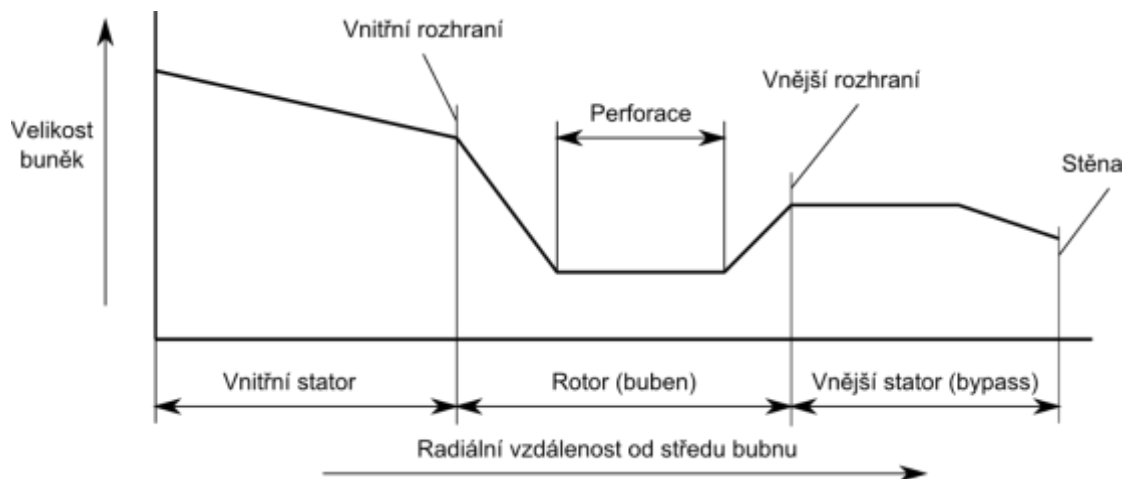
Celkový přehled o uspořádání výpočtové oblasti je uvedeno na Obrázek 6-7 níže.



Obrázek 6-7 Uspořádání výpočtové oblasti

6.3. Vývoj výpočetní sítě

Během vytváření výpočetní sítě je nezbytné vzít do úvahy několik požadavků. Velikosti a typy použitých elementů musí být spolu s hustotou sítě voleny s ohledem na žádanou přesnost výpočtu, dostupnou výpočetní techniku a na fyzikální proces, který je studován. Příliš hrubá síť snižuje přesnost řešení. Naopak příliš jemná síť zvyšuje nároky na výpočetní techniku. [4] Kvantitativní popis dělení sítě je uvedeno na Obrázek 6-8.

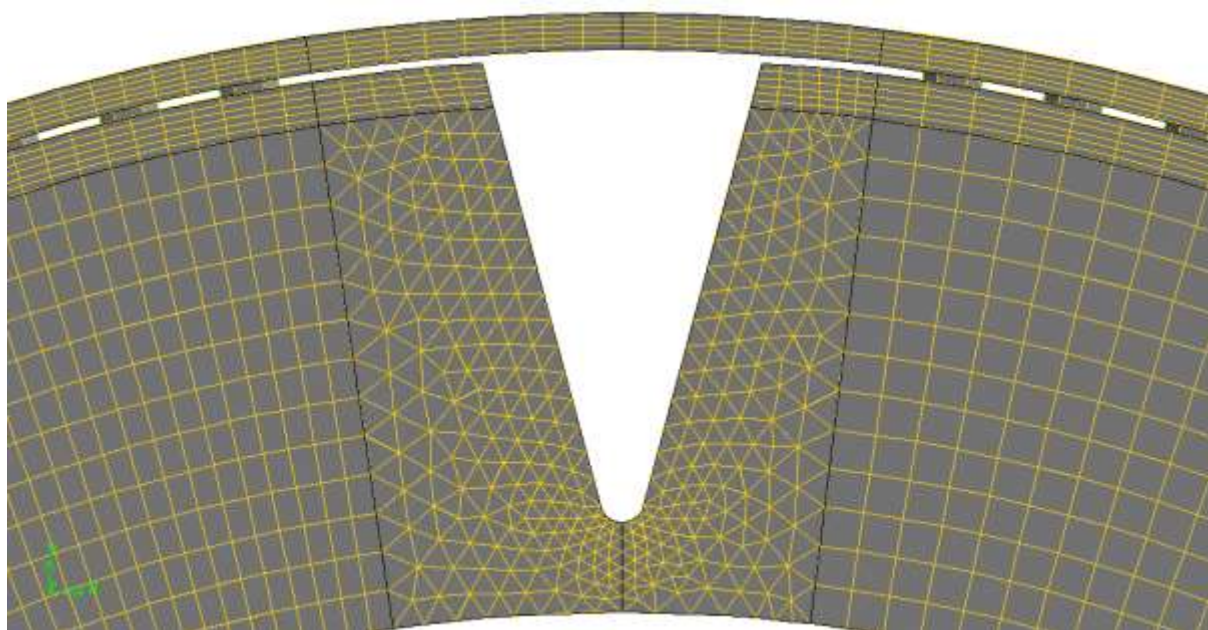


Obrázek 6-8 Kvalitativní rozložení velikosti buněk

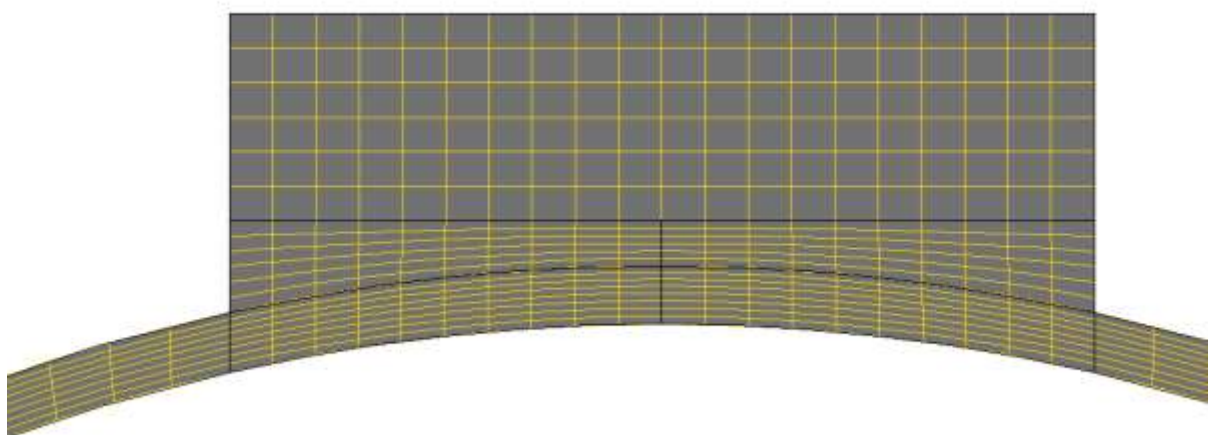
Velikost buněk síťovaného vnitřního satoru má klesavou tendenci ve směru od jeho středu po rozhraní, kde plynule navazuje na velikost buněk rotoru. Větší rozměry buněk byly voleny z důvodu snižování celkového počtu buněk v místech, kde není předpokládána výrazná změna v proudění vzduchu. Buňky umístěné na rozhraní dvou částí nebo v jeho blízkém okolí jsou zhušťovány z důvodu použití nekonformní sítě. Nekonformní síť bývá u mnoha aplikací nežádoucí, neboť může dojít ke ztrátě informací při přechodu mezi sítěmi. V případě analýz s rotujícími prvky je použití nekonformního rozhraní výhodné, avšak má své omezení. Na sdíleném rozhraní nesmí být žádná z buněk zcela uzavřena mezi styčnými plochami. [2] Z důvodu návaznosti na rotující část, kde je síť buněk poměrně jemná, bylo zvoleno i jemnější dělení na jejich rozhraní.

Největší podíl z celkového počtu buněk připadá na rotorovou část. Veškeré podstatné změny v proudění vzduchu uvnitř pracovního prostoru se dějí právě v této části. Síť v okolí žebor bubnu je tvořena prismatickými elementy. Prismatické elementy jsou tvořeny síťováním plochy trojúhelníky, které jsou následně metodou sweep taženy a obtisknuty na protější plochu, čímž dojde k vytvoření objemu buňky. Právě jejich trojúhelníkový charakter je vhodný k definování oblasti zaujímané tekutiny v okolí žebor, neboť s nimi lze dostatečně popsat zaoblení žebor. V okolí perforací bubnu je voleno jemné dělení pro kvalitní identifikaci proudění do a vně bubnu. Výpočetní síť rotorové části je znázorněna na Obrázek 6-9 níže.

Vnější satorová část obsahující vstupní a výstupní okrajovou podmínku je převážně tvořena hexahedrálními elementy. V této podoblasti řešené výpočetní domény je klíčové vhodně diskretizovat okolí vstupní komory a pracovního prostoru, kde je předpokládáno ovlivnění proudu vzduchu rotací bubnu (viz Obrázek 6-9). Souhrnné informace o počtu buněk jsou uvedeny v Tabulka 12.



Obrázek 6-9 Výpočetní síť v okolí žeber



Obrázek 6-10 Výpočetní síť v okolí vstupu vzduchu do pracovního prostoru

Tabulka 12 Souhrnné informace o počtu buněk výpočetní sítě

Podoblast	Počet buněk
Vnitřní stator	333 400
Rotor	1 719 112
Vnější stator (bypass)	234 960
Celkový počet buněk	2 287 472

6.4. Globální nastavení řešiče

Jak bylo zmíněno na začátku této kapitoly, k analýze proudění vzduchu uvnitř bubnové sušičky byl použit komerční software Ansys Fluent 14.5. Software Ansys Fluent poskytuje k řešení analýz s rotujícími prvky několik modelů. V této analýze jsou použity dva modely – MRF („vícenásobný vztažný souřadnicový systém“) a Sliding Mesh („klouzavá síť“), o kterých bude detailněji pojednáno v nadcházejících podkapitolách. Nastavení řešiče platné pro oba použité modely jsou shrnuty v Tabulka 13.

Tabulka 13 Nastavení řešiče

Sekce		Parametr	Nastavení	
Řešič		Typ	Tlakově založený	
		Časový krok	Ustálené (MRF) 10 ⁻⁴ s (Sliding Mesh)	
		Gravitace	Ano	
		Viskozitost (Turbulence)	Realizable k – ε	
		Energie	Ano	
Materiál	Vzduch	Hustota [kg/m ³]	Konstantní – 1,225	
		Tepelná kapacita [J/kg/K]	Konstantní – 1006,43	
		Tepelná vodivost [W/m/K]	Konstantní – 0,0242	
		Viskozita [kg/m/s]	Konstantní – 1,7894·10 ⁻⁵	
	Ocel	Hustota [kg/m ³]	Konstantní – 8030	
		Tepelná kapacita [J/kg/K]	Konstantní – 502,48	
Vstupní okrajová podmínka		Typ	Hmotnostní průtok	
		Hmotnostní průtok [kg/s]	0,2572	
		Intenzita turbulence [%]	5	
		Hydraulický průměr [mm]	322,05	
		Teplota [K]	343,15	
Rotor		Typ	Frame motion (pohyb souřadného systému) – MRF Mesh motion (pohyb sítě) – Sliding Mesh	
		Rychlost [ot/min]	40	
		Směr rotace	X	0
			Y	0
			Z	1
Stěna bubnu		Pohyb stěny	Pohybující se stěna	
		Pohyb	Vztažnost	Relativní k sousedící zóně buněk
			Druh	Rotační
			Rychlost [ot/min]	0
		Výška nerovností [mm]	8·10 ⁻⁵	
Výstupní okrajová podmínka		Typ	Odfuk tlaku	
		Přetlak [Pa]	0	
		Hydraulický průměr [mm]	511,03	

Ačkoliv lze předpokládat turbulentní chování tekutiny, zásadní je volba vhodného turbulentního modelu pro numerický výpočet. V poslední době vzrostla oblíbenost modelu $k - \epsilon$ v praxi díky jeho poměru cena-výkon. [4] Tento turbulentní model je dostupný v několika modifikacích, standard $k - \epsilon$, RNG a realizable $k - \epsilon$. Tato analýza je provedena s využitím realizable $k - \epsilon$, který poskytuje lepší predikci vířivých proudů než zmíněné dvě předchozí modifikace. „ *I přes fakt, že model $k - \epsilon$ je znám svojí nestabilitou při porušení předpokladu isotropní turbulence, a také svojí neschopností adekvátně předvídat separované toky, je v této simulaci upřednostněn jako turbulentní model vzhledem k vysoké výpočetní náročnosti před modely s vyšší přesností. Jako například model RANS nebo LES.*“ (citace z [4])

Kvalitativní posouzení aplikovaných okrajových podmínek ve výpočetní oblasti je popsáno v podkapitole 6.2. Je však důležité připomenout, že vzhledem k umístění dolní hranice výpočetní oblasti dochází ke zpětnému toku, což může nepříznivě ovlivnit výsledky výpočtu. Z tohoto důvodu byla do okolí výstupní okrajové podmínky přidána porézní vrstva, která uměle zvýší tlakovou ztrátu a stabilizuje tok. Parametry porézní vrstvy jsou uvedeny níže v Tabulka 14.

Tabulka 14 Parametry porézní zóny

Parametr		Hodnota
Vektor směr-1		(1,0,0)
Vektor směr-2		(0,1,0)
Formulace odporu relativní rychlosti		Ano
Viskózní odpor	Směr 1 [$1/m^2$]	$1,8 \cdot 10^7$
	Směr 2 [$1/m^2$]	$1,8 \cdot 10^{10}$
	Směr 3 [$1/m^2$]	$1,8 \cdot 10^{10}$
Inerciální odpor	Směr 1 [$1/m^2$]	$2 \cdot 10^3$
	Směr 2 [$1/m^2$]	$2 \cdot 10^6$
	Směr 3 [$1/m^2$]	$2 \cdot 10^6$

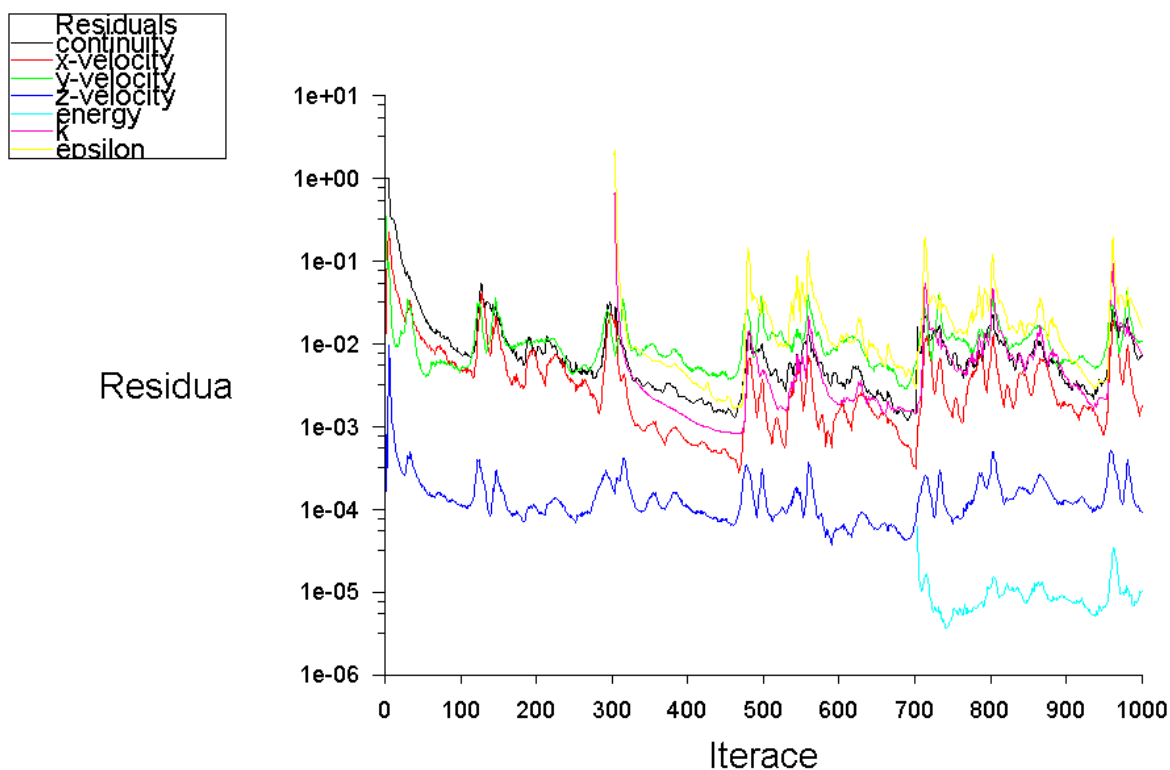
6.5. Multiple Reference Frame (MRF) – ustálené řešení

Pro analýzy zahrnující rotující součásti je využití MRF modelu pravděpodobně jedním z nejjednodušších přístupů z dostupným modelů. [2] Jedná se o ustálenou aproximaci pohybujících se podoblastí výpočetní domény. Proudové pole tekutiny pro dílčí podoblasti řešené domény je řízeno rovnicí zákonem zachování hybnosti s formulací relativní rychlosti. [2]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}_r) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}_r \mathbf{v}_r) + \rho(2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}_r + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) = -\nabla p + \nabla \bar{\boldsymbol{\tau}}_r + \mathbf{F} \quad (5.52)$$

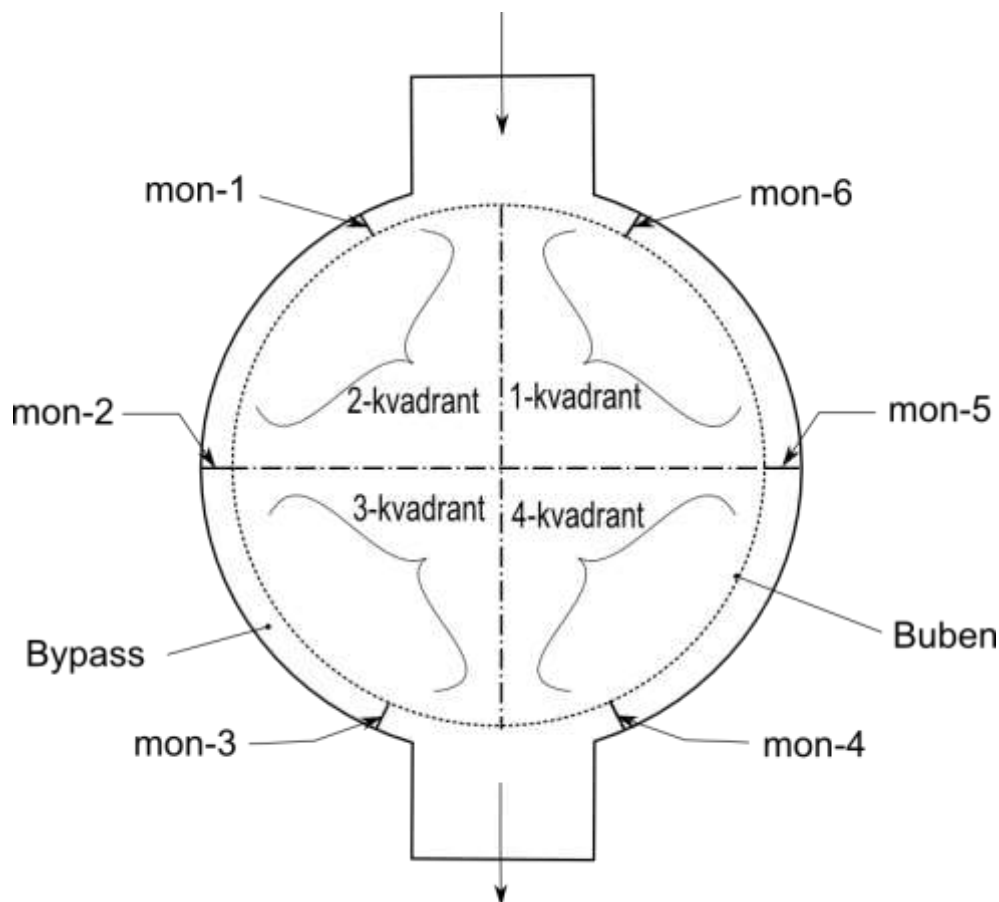
kde \mathbf{v}_r - vektor relativní rychlosti, $\boldsymbol{\omega}$ – vektor úhlové rychlosti, \mathbf{r} – vektor poloměru rotující zóny, p - tlak systému, $\bar{\boldsymbol{\tau}}_r$ – tenzor napětí a \mathbf{F} je vektor hmotnostních sil působících na tekutinu.

Je důležité poznamenat, že aproximace modelem MRF nezahrnuje relativní pohyb rotorové části vzhledem k okolním zónám buněk. Výpočetní síť zůstává nehybná po dobu výpočtu. Využití této aproximace je vhodné pro simulace, při kterých nedochází k významné interakci mezi statorovou a rotorovou částí a průtok rozhraním mezi nimi je relativně nekomplikovaný. [2] V případě analýzy, která je prováděna v této diplomové práci, dochází k silné interakci mezi statorovou a rotorovou částí. Průtok tekutiny skrze jejich rozhraní je ovlivněn blízkými hranicemi výpočetní oblasti a komplexní geometrií bubnu. Zahrnutí aproximace modelem MRF do analýzy je vhodné pro výpočet proudového pole, které je pak použito jako výchozí stav pro neustálený výpočet. Tímto přístupem dojde k potlačení počáteční nestability neustáleného řešení. [2] Residua ustáleného řešení jsou uvedeny na Obrázek 6-11.



Obrázek 6-11 Residua ustáleného výpočtu

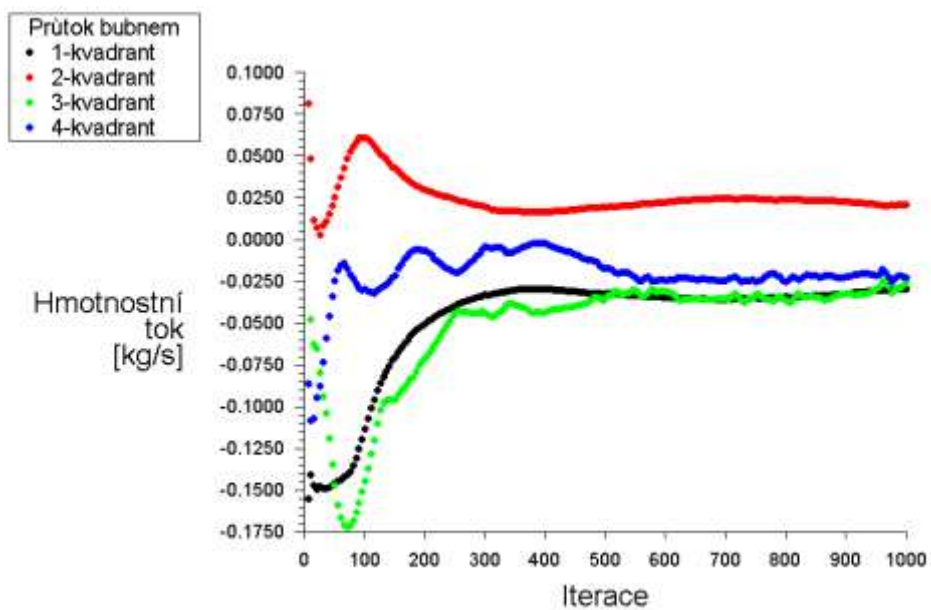
Rezidua uvedené výše na Obrázek 6-11 vykazují neustálený průběh a jejich konvergence nenastává. Toto chování residuí naznačuje nevhodnost analýzy řešené jako ustálené. Nicméně pro kvalitní odhad proudového pole, které je následně použito pro neustálené řešení, je nezbytné posoudit výsledky získané z toto řešení a prokázat jejich vhodnost použití pro další analýzu. Z tohoto důvodu byly do výpočetní oblasti zahrnuty monitorovací plochy, ze kterých jsou získány informace o hmotnostním průtoku těmito oblastmi. Rozložení monitorovacích ploch je uvedeno na Obrázek 6-12.



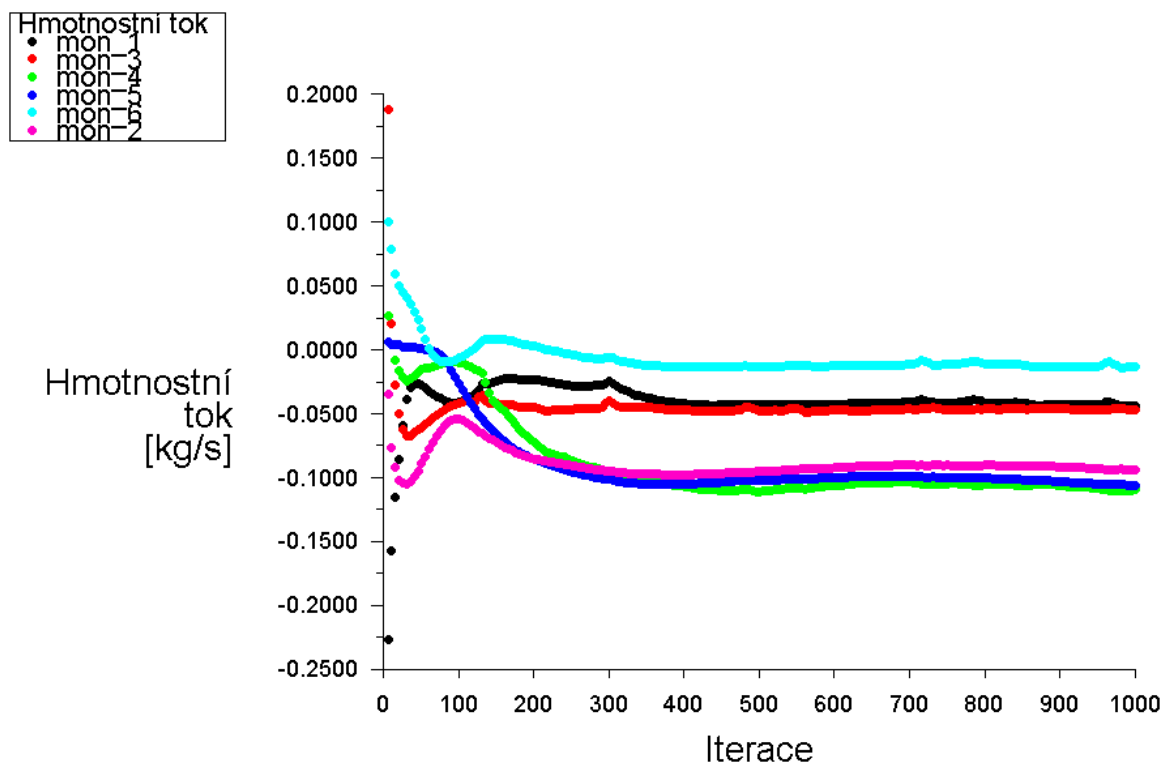
Obrázek 6-12 Rozložení monitorovacích ploch v pracovním prostoru sušičky

Z průběhů hmotnostních toků kontrolními plochami, které jsou znázorněny na Obrázek 6-13, a Obrázek 6-14 na následující stránce je patrné, že postupnou iterací dojde k ustálení jejich hodnot. Tímto ustálení hodnot lze považovat vypočtené proudové pole jako dobrý počáteční odhad pro neustálený výpočet.

Využitím hodnot získaných z ustálené analýzy lze předběžně odhadnout průtok sušícího média dovnitř prostoru bubnu. Přímou integrací hodnot hmotnostního průtoku jednotlivými kvadranty bubnu je možné odhalit, zda dochází uvnitř bubnu ke zdržení proudícího média. Výsledná hodnota této integrace je nulová. Hodnota této integrace je způsobena chápáním proudícího média při výpočtu jako nestlačitelný plyn.



Obrázek 6-13 Hmotnostní tok bubnem

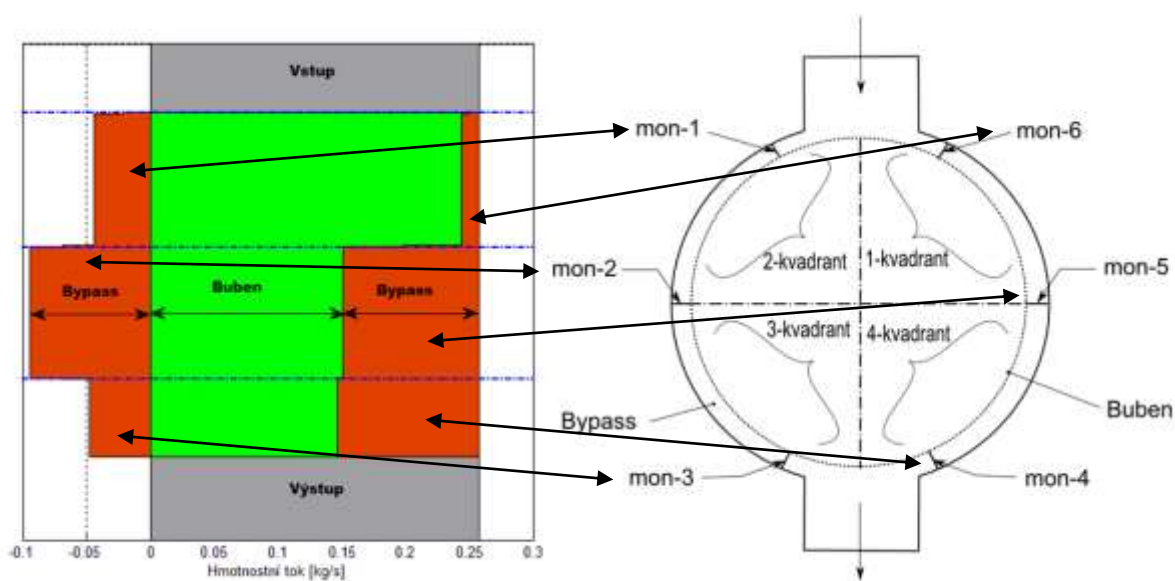


Obrázek 6-14 Průtok kontrolními plochami v bypasse

Identifikovat množství vzduchu, které proteče dovnitř prostoru bubnu pomocí přímé integrace hodnot hmotnostního toku na monitorovacích plochách bubnu nelze. Možným způsobem jak analyzovat toto množství vzduchu je nepřímě. Využitím hodnot průtoku monitorovacími plochami v bypasse lze určit množství vzduchu, které jimi proteče. Následnou integrací a odečtením této hodnoty od hmotnostního toku vzduchu na vstupu do pracovního prostoru bubnové sušičky prádla. Kvalitativní rozložení hmotnostního v pracovním prostoru je uvedeno na Obrázek 6-15. Zelená barva značí množství vzduchu proudícího do bubnu, oranžová znamená množství vzduchu v bypasse a šedá je pro okolí vstupní a výstupní okrajové podmínky.

Skokový průběh hmotnostního toku uvedeném na Obrázek 6-15 je způsoben hrubým rozložením monitorovacích ploch v průřezu statorové části, neboť jsou známy pouze hodnoty na těchto plochách. A k čemu dochází mezi nimi, není známo. Jemnějším rozložením monitorovacích ploch by byl získaný průběh křivek hmotnostního průtoku vzduchu do bubnu hladší.

Z grafického vyjádření rozložení hmotnostního toku v pracovním prostoru je jednoznačně patrné, že v případě provedené ustálené analýzy se množství proudícího vzduchu snižuje s postupným přibližováním se výstupu z pracovního prostoru. Výsledkem této simulace bylo tedy stanoveno průměrné množství vzduchu protékající bubnem na 70,19 % ze vstupního množství vzduchu do bubnové sušičky prádla.



Obrázek 6-15 Rozložení hmotnostního toku

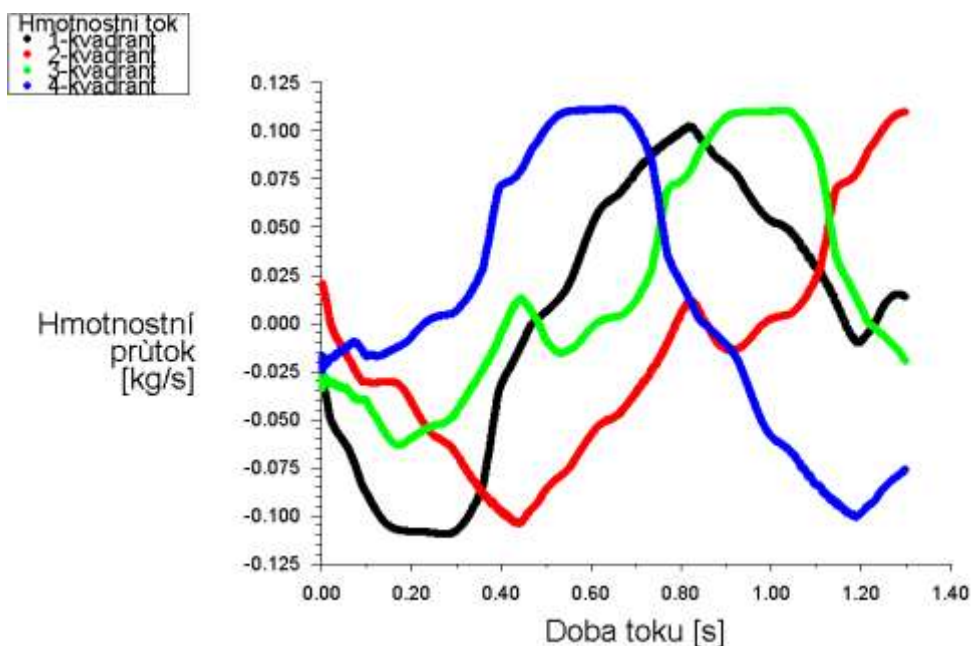
6.6. Sliding Mesh – neustálené řešení

Nástavbou odhadnutého proudového pole tekutiny získaného z ustáleného řešení pomocí MRF modelu, je přechod k neustálenému řešení v podobě Sliding Mesh (klouzavá síť) modelu. Jak bylo zmíněno v předchozí podkapitole, model MRF je používán v případech, kdy dochází ke slabé interakci mezi částí statoru a rotoru. Neustálený výpočet s využitím klouzavé sítě na rozdíl od MRF nezanedbává neustálené interakce. Obecně jsou rozlišovány tři typy neustálené interakce – potenciální, nucené a rázové. [2] V případě této analýzy se jedná o první, tedy potenciální interakci, kdy nestabilita toku vzniká vlivem tlakových vln, které se šíří ve směru i proti směru proudícího média. Další významný rozdíl mezi použitými dvěma modely je rozdíl v chování rotorové části během kalkulace. V ustáleném řešení pomocí MRF je rotorová část statická a vliv rotace rotoru na proudění tekutiny je zahrnut v systému řídicích rovnic. U neustáleného výpočtu dochází k relativnímu pohybu sítě mezi sousedícími buňkami statorové a rotorové části (klouzavá síť). Použitá diskretizační schémata jsou uvedeny v Tabulka 15.

Tabulka 15 Diskretizační schéma

Pressure-velocity coupling	SIMPLE
Transient Formulation	First order Implicit
Spatial Discretization	
Gradient	Least squares cell based
Pressure	Standard
Momentum	Second Order Upwind
Turbulent kinetic Energy	First Order Upwind
Turbulent Dissipation Rate	First Order Upwind
Energy	Second Order Upwind

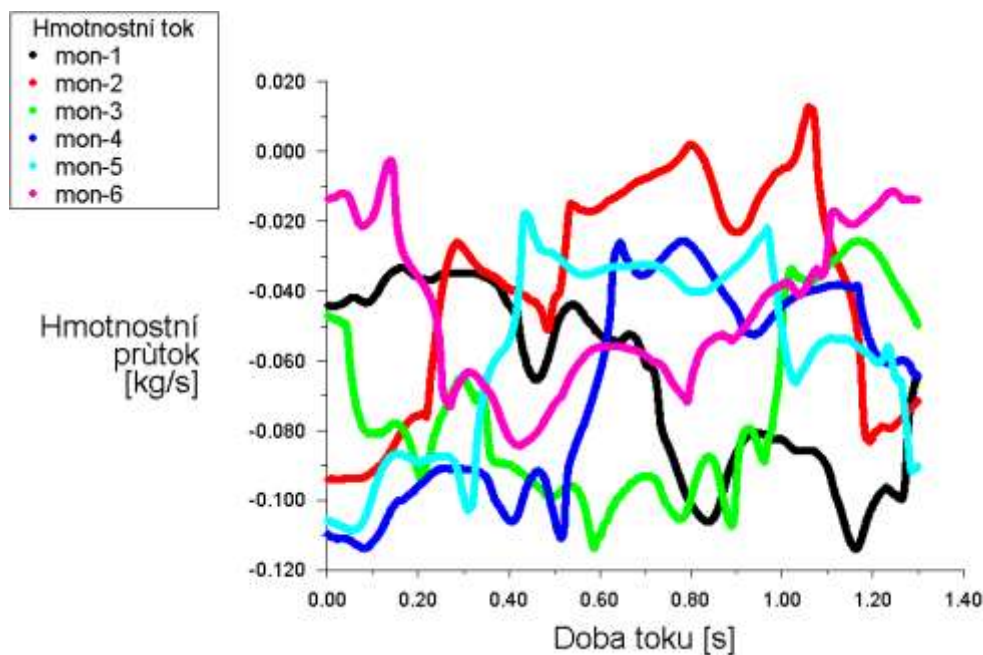
Z průběhu hodnot hmotnostního toku kontrolními plochami bubnu na Obrázek 6-16 je na první pohled patrný značný rozdíl od dat získaných ustáleným výpočtem (Obrázek 6-13). Tento rozdíl ze způsoben odlišným přístup řešení pohybu rotorové části (viz předchozí odstavec). Při rotaci bubnu dochází k relativní změně pozice jednotlivých monitorovacích ploch vzhledem ke vstupní okrajové podmínce, čímž je způsoben neustálený průběh hmotnostního toku monitorovacími plochami. Typický představitel tohoto jevu je modrá křivka na Obrázek 6-16, která značí průtok vzduchu 4. kvadrantem bubnu. Na počátku výpočtu je nejvíce vzdálený tok vstup vzduchu do pracovního prostoru bubnové sušičky. Jak buben postupem času rotuje, kvadrant se přibližuje ke vstupu a dochází k silnější interakci mezi ním a nasávaným vzduchem, což má za následek nárůst hmotnostního toku vzduchu jeho monitorovacími plochami.



Obrázek 6-16 Hmotnostní tok bubnem – Sliding Mesh

Představitelem opačného případu je 2. kvadrant (červená křivka - Obrázek 6-16). V první fázi je v úzkém kontaktu s nasávaným vzduchem a jeho hmotnostní tok tímto kvadrantem je veliký. V průběhu simulace se jeho vzdálenost od vstupu zvětšuje a hmotnostní tok do bubnu tímto kvadrantem klesá.

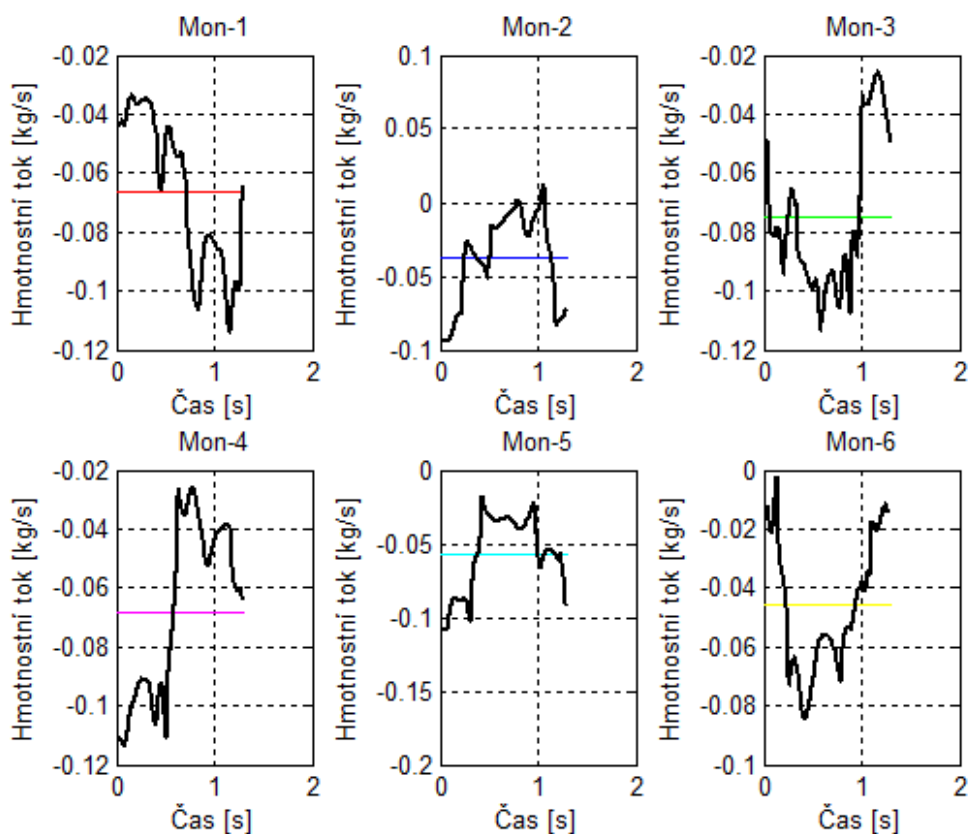
Co se hmotnostního toku bypassem týče, k jeho výrazné změně dochází v době, kdy tyto monitorovací plochy míjí část bubnu, na které je instalováno žebro. Tato část bubnu není z vnější strany perforována. V důsledku absence perforace této části pláště bubnu dojde k „nahromadění“ vzduchu v bypasse, protože proudící médium nemůže prostupovat dovnitř bubnu. Průběhy hmotnostních toků jsou uvedeny na Obrázek 6-17.



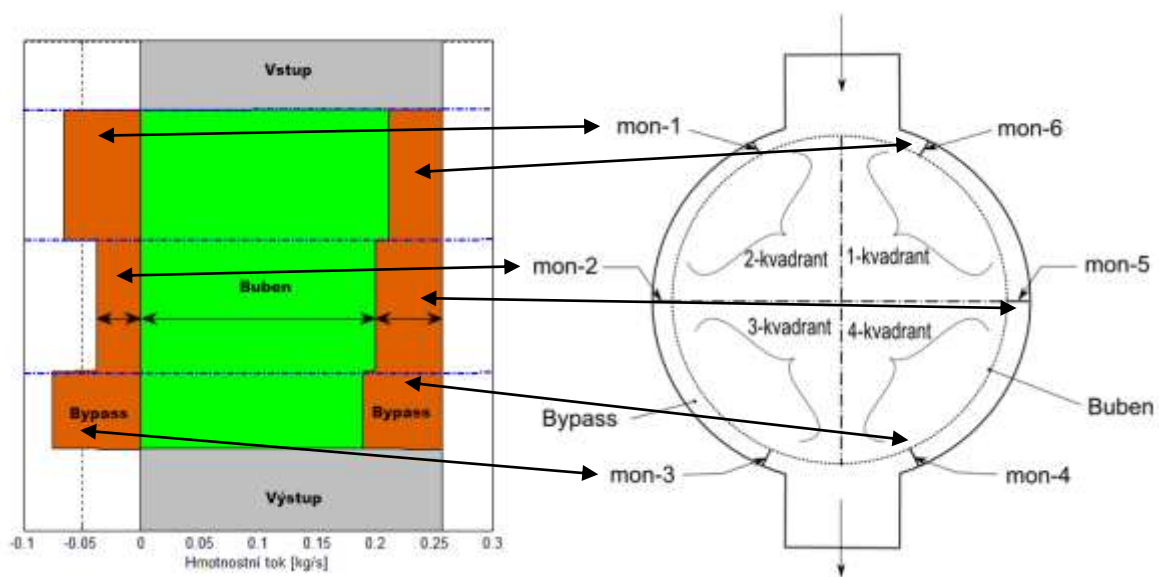
Obrázek 6-17 Hmotnostní průtok bypassem – Sliding Mesh

Stejně jako v případě ustálené simulace provedené v předchozí podkapitole, je k určení množství vzduchu proudícího dovnitř bubnu sušičky použita nepřímá metoda. I když průběhy hmotnostních toků monitorovacími plochami umístěných na bubnu jsou neustálené, stále je jejich integrace v každém časovém okamžiku rovna nule, neboť sušící vzduch je i v případě neustáleného výpočtu uvažován jako nestlačitelný plyn.

Výsledkem ustáleného výpočtu je jedna platná hodnota hmotnostního průtoku pro danou monitorovací plochu. U neustáleného řešení je získána sada dat, které se spolu s časem mění. Použitím hodnot v daném časovém kroku pro určení množství vzduchu proudícího do bubnu by se jednalo o jeho aktuální hodnotu. K získání celkové představy, jaké množství vzduchu proteče bubnem v daném časovém úseku, byly hodnoty průtoků monitorovacími plochami zprůměrovány v čase. Průměrné hodnoty hmotnostního toku plochami je uveden na Obrázek 6-18 níže. S využitím těchto hodnot byl stanoven průměrný hmotnostní tok vzduchu bubnem v daném časovém úseku na 77,8 % z nasávaného množství vzduchu. Průběh hmotnostního toku je uveden na Obrázek 6-19.



Obrázek 6-18 Průměrné hodnoty hmotnostního toku



Obrázek 6-19 Rozložení hmotnostního toku – Sliding Mesh

7. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo analyzovat proudění uvnitř radiální bubnové sušičky prádla a sestavit transientní bilanční model popisující proces sušení.

Úvodní část práce je věnován obecnému popisu matematického modelování výpočetní dynamiky tekutin (CFD). CFD analýza byla využita pro popis proudění uvnitř pracovního prostoru, zejména v okolí rotujícího bubnu. Dále pak jsou zevrubně popsány fyzikální děje, kterými je sušení řízeno. Detailněji jsou v první kapitole popsány všechny tři časové periody, na které lze sušení jako takové rozdělit. Jedná se o zahřívací, konstantní a klesající periodu. Během zahřívací periody dochází k ohřevu prádla. Ve druhé, konstantní, periodě je vytahována volná vlhkost. V závěrečné periodě významně klesá rychlost sušení, neboť je extrahována vázaná vlhkost zevnitř vláken na jejich povrch a až posléze odváděna sušicím médiem.

Ve druhé kapitole je proveden globální popis zařízení a proudění sušícího média. Pozornost je zde věnována stavovým změnám sušícího média vlivem jeho ohřevu výměníkem tepla. Ohřevem média dojde ke zlepšení schopnosti sušícího vzduchu pojmout vlhkost z povrchu prádla, neboť saturační tlak nasycených par obsažených ve vzduchu je funkcí teploty. Rozdílné koncentrace vodní složky sušícího média a fázového rozhraní jsou hnací silou celého procesu.

Během realizace této práce bylo uskutečněno pokusné měření, které je detailně popsáno v kapitole 3. Cílem této práce bylo experimentálně změřit délku trvání sušícího cyklu, získat pevné vstupní hodnoty do bilančního modelu. Mezi tyto hodnoty patří například obsah vody v prádle na začátku a na konci sušícího cyklu. Z tohoto důvodu bylo před samotným sušením prádlo vypráno, odstředěno a následně vloženo do parní sušičky. Jako sušený materiál byly použity froté ručníky. Průběh hmotnosti vsázky byl měřen pomocí tenzometrických snímačů umístěných na stojinách aparátu. Z rozboru hmotnostních dat vsázky bylo zjištěno, že data jsou zatížena systematickou chybou v podobě připouštění páry do výměníku, což se projevilo v nárůstu hodnot snímaných tenzometrem. Šum naměřených dat je způsoben převalováním vsázky uvnitř bubnu. Dále pak bylo během experimentu provedeno vizuální pozorování pohybu prádla během rotace bubnu. Z tohoto pozorování bylo usouzeno, že pohyb prádla je významně ovlivněn obsahem vlhkosti a ložnou hmotností vsázky (více v podkapitole 3.3.3).

Před samotnou konstrukcí transientního bilančního modelu byl proveden přehled dostupné literatury zabývající sušením. Značná část dostupných zdrojů je věnována sušením nejrůznějších materiálů, avšak byl nalezen pouze jeden zdroj vhodný pro tvorbu bilančního systému rovnic této práce (více informací je uvedeno v podkapitole 4.1. a příslušných podkapitolách). Sestaveným systémem rovnic řídicí transientní bilanční výpočet byla uskutečněna simulace sušícího procesu. Simulace byla formulována z dostupných analytických vztahů pro určení součinitele přestupu tepla α a součinitele přestupu hmoty k . Z výsledku takto definované simulace vyšlo najevo, že s tímto způsobem součiniteli by sušící proces trval zhruba pětinasobně déle než samotný experiment. Zásadním parametrem, tedy stupněm volnosti, ovlivňující bilanční model byl zvolen součinitel přestupu tepla α , neboť druhý zmíněný součinitel k je funkcí součinitele přestupu tepla. Součinitel přestupu tepla α je funkcí proudění tekutiny. Pro koncepci vnitřní geometrie pracovního prostoru bubnové sušičky nebyly nalezeny vhodné podklady pro její určení. Během experimentálního měření nebyl proveden žádný test na určení součinitele přestupu tepla. Způsob přizpůsobení součinitele přestupu tepla pro provedený experiment je uveden v podkapitole 4.4

V kapitole 5 byl sestaven čistě difuzní model sušení prádla pomocí příslušných diferenciálních rovnic. Tento difuzní model popisuje vedení tepla a distribuci uvnitř sušeného materiálu pro značně zjednodušenou geometrii. Uvažovaná geometrie u difuzního modelu je popsána jako statický válec, který je plně zaplněn sušeným prádlem. Je nutné podotknout, že tento zmíněný model byl vyhotoven nad rámec diplomové práce a jeho vypovídací hodnota je pouze orientační. Cílem této kapitoly bylo poukázat na vzájemnou korelaci mezi vedením tepla a obsahem vlhkosti v prádle.

Poslední kapitola této práce je věnována výpočtové analýze proudění sušícího média uvnitř pracovního prostoru bubnové sušičky prádla. Pro provedenou analýzu bylo zásadní vhodně převést skutečnou geometrii do virtuální podoby. Buben je opatřen značným množstvím perforací, které zvyšují komplexnost jeho geometrie. Tyto perforace bylo nutné vhodně nahradit, neboť jejich počet vedl k enormnímu nárůstu celkového množství výpočetních buněk a značně tak narostla výpočetní náročnost. V podkapitole 6.1 je uveden princip zjednodušení geometrie spolu s uvažovanými náhradami perforace bubnu. Výsledné zjednodušení virtuálního bubnu provedeno snížením počtu perforací na čtvrtinu reálného počtu při dvojnásobném zvětšení průměru kruhových děr tvořících perforace. Při realizaci výpočetní sítě bubnu bylo toto kruhové perforování aproximováno vepsanými sedmiúhelníky, čímž došlo ke snížení numerické průtočné plochy o 14,8 % oproti původnímu stavu (viz Obrázek 6-5). Po vytvoření sítě byla realizována dvojí simulace proudění. První simulace byla vedena jako ustálená s využitím dostupného MRF modelu, který Ansys Fluent poskytuje pro řešení problémů obsahující rotující části. Analyzováním získaných výsledků z této simulace bylo určeno množství vzduchu, které proteče bubnem na 70,19 % hm. z nasávaného množství vzduchu. MRF model zanedbává nestacionární interakce mezi rotujícím vztažným systémem a statickým vztažným systémem. Z tohoto důvodu bylo vypočtené proudové pole použito jako počáteční hodnota vstupující do neustáleného výpočtu provedeného pomocí modelu Sliding Mesh. Sliding Mesh byl zvolen pro jeho schopnost popisovat nestacionární interakce mezi zmíněnými souřadnými systémy. Získané výsledky z neustálené simulace jsou v proměnné v čase, proto byly vypočteny jejich časově průměrné hodnoty. Z těchto hodnot bylo stanoveno průměrné množství vzduchu, které protéklo bubnem v daném časovém úseku na 77,8 % ze vstupního hmotnostního toku. Je důležité zmínit, že tyto hodnoty vzduchu proudícího do bubnu jsou získány simulací pro prázdný buben. V případě, že je v bubnu umístěno prádlo dojde k částečnému zahlcení perforace bubnu a výrazně větší poměrná část vzduchu bude tlačena bubnem v bypasse a nedostane se tak do kontaktu s vloženým prádlem.

8. Použitá literatura

- [1] ANDERSON, J.D. *Computational Fluid Dynamics: The basic applications*, McGraw Hill, 1995
- [2] Ansys Inc., *Ansys 14.5 Help: Fluent*, c 2013
- [3] BENTZ, D.P., FLYNN, D.R., KIM, J.H., ZARR, R.R. *A Slug Calorimeter for Evaluating the Thermal Performance of Fire Resistive Materials*, Fire and Materials, Vol. 30 (4), pages 257-270, 2006
- [4] ČERMÁK, M. *Výpočty proudění a přenosu tepla pro optimalizaci konstrukce bubnové sušičky prádla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 69 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Hájek, Ph.D..
- [5] DEANS, J. *The modelling of a domestic tumbler dryer*. Applied Thermal Engineering, Vol. 21, Issue 9, June 2001, Pages 977-990. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431100000922>
- [6] GUTOVSKÝ, J. *Experimentální měření v oblasti průmyslového sušení textilu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 59 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vítězslav Máša, Ph.D..
- [7] HAGHI, A. K. *Thermal analysis of drying process*, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 84 (2003), pages 827-842.
- [8] HÁJEK, J. *Modelování s využitím CFD - I*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2008.
- [9] HUSSAIN, M. M., DINCER, I. *Two-dimensional heat and moisture transfer analysis of a cylindrical moist object subjected to drying: A finite-difference approach*, International Journal of Heat and Mass transfer, Volume 46, Issue 21, October 2003, Pages 4033 – 4039.
Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931003002291>>
- [10] CHILDS, A., *Rotaring Cylinders, Anuuli, and Spheres*. Edinburgh: The university of Edinburgh, School of Engineering. DOI:10.1016/B978-0-12-382098-3.00006-8, 2011.
Dostupné z: <http://www.see.ed.ac.uk/~shs/Climate%20change/Flettner%20ship/Childs%20Annuli.pdf>
- [11] INCROPERA, FRANK, P., a kol., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer (6th edition)*, Hoboken, ISBN 0-471-45728-0

- [12] INGRAM, A., SEVILLE, J.P.K., PARKER, D.J., FAN, X., FORSTER, R.G.. *Axial and radial disperision in rolling mode rotating drum*. Powder Technology, Vol. 158, Issue 1-3, 27 October 2005, str. 76 - 91. Dostupné z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591005001592>
- [13] KRISCHER, O., KROLL, K. *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungs-technik*, Springer, Berlin, 1963, str. 56
- [14] LearnEngineering [on-line]. [cit. 25. 3. 2014], 2011, Dostupné z:
<http://www.learnengineering.org/2013/05/What-is-CFD-computational-fluid-dynamics.html>
- [15] MathWorks, The, Inc., *Matlab R2012b*, c 1984-2012
- [16] PAVELEK, M. a kol. *Termomechanika*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 80-214-2409-5
- [17] PRIMUS CE, *Technical specifications: Industrial tumble dryers*, Product brochure, 2012
- [18] TR instruments spol. s.r.o.. *Měřicí technika*, Katalog produktů, 2014
- [19] WICHTERLE, K., VEČEŘ M.. *Základy procesního inženýrství*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. 1 CD-ROM. ISBN 978-80-248-2580-9.
- [20] YADAV, V., MOON, C. G. *Fabric-drying process in domestic dryers*. Applied energy. Vol. 85, Issue 2-3, Februar – March 2008, Pages 143-158. Dostupné z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261907000918>

9. Seznam použitých symbolů

Symbol	Popis	Jednotka
a	Zrychlení; Koeficient aktivity	m/s^2 ; 1
A	Plocha	m^2
Bi	Biotovo číslo	1
C	konstanta	1
cp	Měrná tepelná kapacita	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
D	Difuzní koeficient; Průměr	m^2/s ; m
D _h	Hydraulický průměr	m
E	Energie	J
e	Eulerovo číslo	1
F	Síla	N
f	Hmotnostní síla	N/kg
Fo	Furierovo číslo	1
h	Šířka bypassu	m
k	Součinitel přestupu hmoty	$\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$
l	Délka bypassu	m
Le	Lewisovo číslo	1
m	Hmotnost	kg
m	Počet buněk v x-ovém směru	1
n	Počet buněk v y-ovém směru	1
Nu	Nuseltovo číslo	1
P	Tlak	Pa
p	Počet časových kroků	1
Pr	Prandtlovo číslo	1
q	Tepelný tok jednotkou plochy	W/m^2
Q̇	Tepelný tok	W
R	Poloměr bubnu	m
r	radiální souřadnice válce	m
Re	Reynoldsovo číslo	1
S	Průtočná plocha	m^2
T	Tenzor napětí; Teplota	MPa ; °C
t	čas	s
u	x-složka rychlosti	m/s
v	Rychlost; y-složka rychlosti	m/s
Ṽ	Objemový průtok	m^3/s
w	z-složka vektoru rychlosti	m/s
x	Obsah vlhkosti ve vzduchu	1
X	Obsah vlhkosti v prádle	1
Y	Obsah vlhkosti ve vzduchu	1
Dolní index	Popis	Jednotka
ac	akumulace	
air	Vztaženo na vzduch	
cl	Vztaženo na prádlo	
drum	Vztaženo na buben	
dry	Vztaženo na suché prádlo	
evap	výpařování	
f	Fázové rozhraní	

VÝPOČTOVÁ ANALÝZA PROUDĚNÍ V BUBNOVÉ SUSIČCE PRÁDLA

H ₂ O	Vztaženo na vodu	
i	Počáteční hodnota	
in	vstup	
loss	ztráta	
out	výstup	
r	Radiální	
sat	Saturované	
w	Vztaženo na vodu	
wet	Vztaženo na vlhké prádlo	
Horní index	Popis	Jednotka
p	Číslo časového kroku	
Řecké symboly	Popis	Jednotka
α_t	Termální difuze	m ² /s
α	Součinitel přestupu tepla	W/ m ² /K
β	Koeficient materiálu prádla	1
γ	Koeficient materiálu prádla	1
δ	Koeficient materiálu prádla	1
η	Dynamická viskozita	Pa/s
λ	Tepelná vodivost	W/ m/K
ρ	Hustota	kg/m ³
τ	Tenzor napětí	MPa
φ	Úhlová souřadnice válce	°
ω	Úhlová rychlost	rad/s
ϕ	Skalární veličina	1
∇	Nabla	1

10. Seznam obrázků

Obrázek 1-1 Konečné objemy; (a) nepohyblivý, (b) pohyblivý.....	4
Obrázek 1-2 Infinitesimální objemy; (a) nepohyblivý, (b) pohyblivý	4
Obrázek 1-3 Jednoduchý příklad kontrolního objemu CFD simulace	5
Obrázek 1-4 Kontrolní objem pro bilancování	6
Obrázek 1-5 Princip numerického řešení (převzato z [14])	6
Obrázek 1-6 Grafické vyjádření průměrování skutečné hodnoty	7
Obrázek 1-7 Grafické znázornění průběhu konstantní a klesající periody.....	9
Obrázek 2-1 Vyobrazení průmyslové sušičky T24/T35	10
Obrázek 2-2 Zadní strana bubnové sušičky	11
Obrázek 2-3 Přívod a odvod vzduchu	12
Obrázek 2-4 Detail odtokové části sušičky	12
Obrázek 2-5 Odtoková část a filtr pevných částic	13
Obrázek 2-6 Přívod páry a odvod kondenzátu	13
Obrázek 2-7 Perforace a žebrování bubnu	14
Obrázek 2-8 Ohřívací jednotka.....	15
Obrázek 3-1 Plošinová váha s nájezdem	17
Obrázek 3-2 Snímání výstupní teploty a relativní vlhkosti vzduchu	18
Obrázek 3-3 Experimentální data relativní vlhkosti	18
Obrázek 3-4 Schéma zapojení a umístění Prandtlovy trubice (.....	19
Obrázek 3-5 Průběh diferenčního tlaku.....	20
Obrázek 3-6 Průběh výstupní teploty sušícího media	20
Obrázek 3-7 a) Schéma zapojení tenzometrů; b) Výstupní panel	21
Obrázek 3-8 Experimentální data hmotnosti vsázky.....	21
Obrázek 3-9 Příkon bubnové sušičky.....	23
Obrázek 3-10 Příklad pohybu vsázky ve formě kohesivních svazků (převzato z [12])	23
Obrázek 4-1 Schéma konvenční domácí sušičky.....	25
Obrázek 4-2 Diskretizace bubnu.....	26
Obrázek 4-3 Hranice oblasti Deansova modelu	27
Obrázek 4-4 Bilanční hranice bubnové sušičky.....	28
Obrázek 4-5 Závislost tepelné kapacity na teplotě	29
Obrázek 4-6 Typické desorpční isotermy vláken	30
Obrázek 4-7 Vizualizace průtočné plochy	32
Obrázek 4-8 Odhad součinitele přestupu tepla a hmoty.....	33
Obrázek 4-9 Průběh hmotnosti vsázky – odhad α a k	33
Obrázek 4-10 Princip přizpůsobení modelu	34
Obrázek 4-11 Aproximovaný průběh hmotnosti	35
Obrázek 4-12 Vývoj teploty prádla v čase	36
Obrázek 4-13 Průběh součinitele α a k	37
Obrázek 4-14 Klouzavý průměr	38
Obrázek 4-15 Porovnání trendu dat a transientního modelu	39
Obrázek 4-16 Připouštění páry do výměníku tepla.....	39
Obrázek 4-17 Detail připouštění páry	40
Obrázek 5-1 Geometrie difuzního modelu	42
Obrázek 5-2 Výsledná oblast řešení diferenciálních rovnic	43
Obrázek 5-3 2D vedení tepla - a) Síť buněk; b) aproximace konečnými prvky	45
Obrázek 5-4 Síťování plochy na hranici oblasti	47
Obrázek 5-5 Uzel v pravém horním rohu oblasti.....	48
Obrázek 5-6 Pravý dolní roh oblasti	49

Obrázek 5-7 <i>Průběh součinitele α a k pro čistě difuzní model</i>	50
Obrázek 5-8 <i>Průběh teploty fázového rozhraní v čase</i>	51
Obrázek 5-9 <i>Rozložení teploty prádla v čase</i>	52
Obrázek 5-10 <i>Rozložení vlhkosti v prádle v závislosti na čase</i>	52
Obrázek 5-11 <i>Porovnání průběhu hmotnosti pro difuzní a transientní model</i>	53
Obrázek 6-1 <i>Detail perforovaného bubnu</i>	54
Obrázek 6-2 <i>Vzorek pro určení tlakové ztráty původní geometrie</i>	55
Obrázek 6-3 <i>Náhrada původní geometrie</i>	55
Obrázek 6-4 <i>Virtuální geometrie bubnu</i>	56
Obrázek 6-5 <i>Vizualizace numerické průtočné plochy bubnem</i>	57
Obrázek 6-6 <i>Detail odfukové části</i>	58
Obrázek 6-7 <i>Uspořádání výpočtové oblasti</i>	59
Obrázek 6-8 <i>Kvalitativní rozložení velikosti buněk</i>	60
Obrázek 6-9 <i>Výpočetní síť v okolí žeber</i>	61
Obrázek 6-10 <i>Výpočetní síť v okolí vstupu vzduchu do pracovního prostoru</i>	61
Obrázek 6-11 <i>Residua ustáleného výpočtu</i>	64
Obrázek 6-12 <i>Rozložení monitorovacích ploch v pracovním prostoru sušičky</i>	65
Obrázek 6-13 <i>Hmotnostní tok bubnem</i>	66
Obrázek 6-14 <i>Průtok kontrolními plochami v bypasse</i>	66
Obrázek 6-15 <i>Rozložení hmotnostního toku</i>	67
Obrázek 6-16 <i>Hmotnostní tok bubnem – Sliding Mesh</i>	69
Obrázek 6-17 <i>Hmotnostní průtok bypassem – Sliding Mesh</i>	69
Obrázek 6-18 <i>Průměrné hodnoty hmotnostního toku</i>	70
Obrázek 6-19 <i>Rozložení hmotnostního toku – Sliding Mesh</i>	71

11. Seznam příloh

- Příloha 1 - Fyzikální vlastnosti vzduchu
- Příloha 2 – Fyzikální vlastnosti vody
- Příloha 3 - Vizualizace výsledků CFD analýzy
- CD-ROM

Příloha 1 – Fyzikální vlastnosti vzduchu

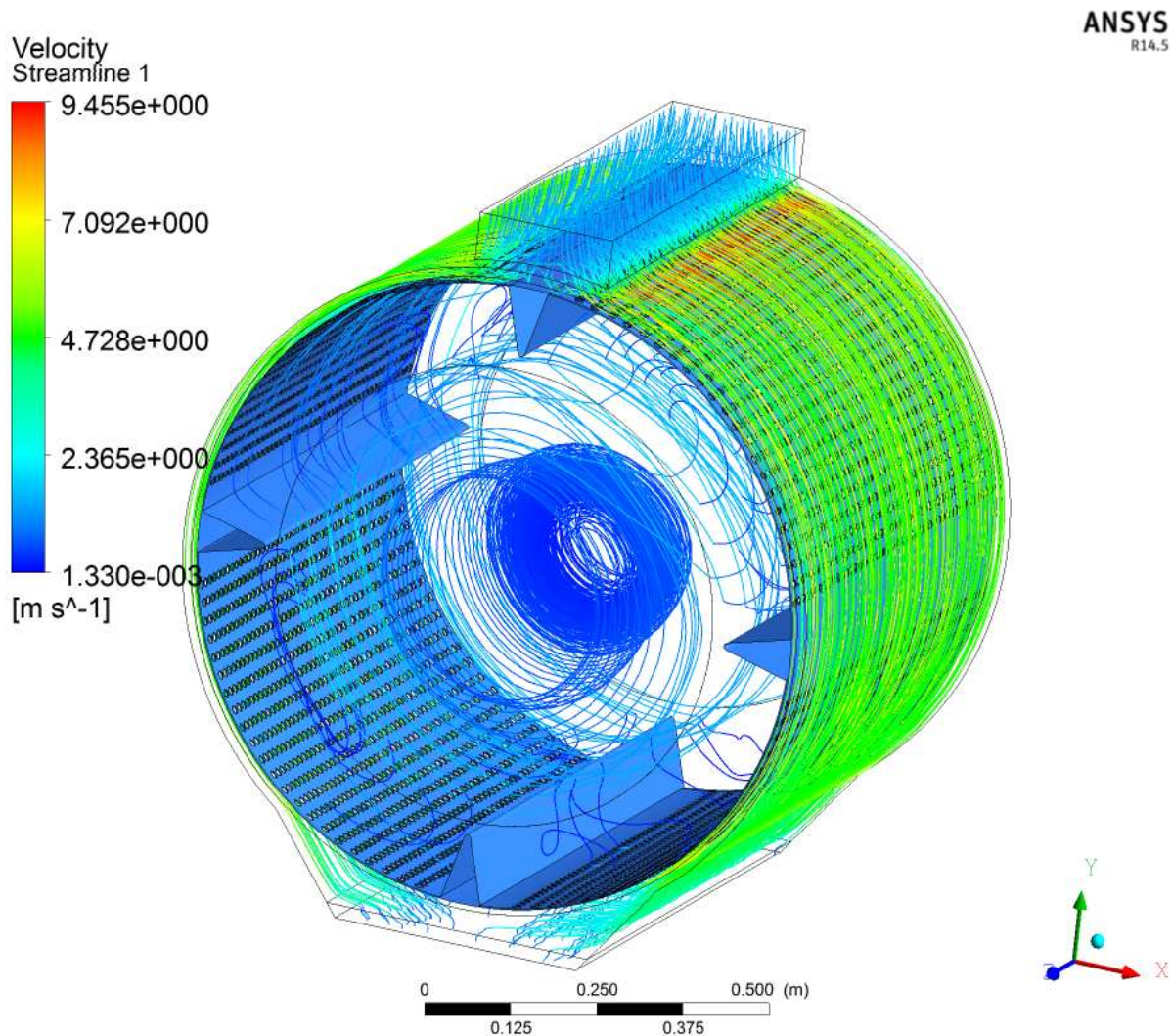
T [°C]	ρ [kg/m ³]	c_p [kJ/kg/K]	$\lambda \cdot 10^2$ [W/m/K]	$a \cdot 10^5$ [m ² /s]	$\eta \cdot 10^6$ [Ns/m ²]	$\nu \cdot 10^6$ [m ² /s]	Pr
0	1,252	1,009	2,372	1,875	17,16	13,70	0,723
10	1,202	1,009	2,454	2,011	17,75	14,70	0,722
20	1,164	1,013	2,524	2,128	18,24	15,70	0,722
30	1,127	1,013	2,582	2,261	18,73	16,61	0,722
40	1,092	1,013	2,652	2,403	19,22	17,60	0,722
50	1,056	1,017	2,721	2,539	19,61	18,60	0,722
60	1,025	1,017	2,803	2,680	20,10	19,60	0,722
70	0,996	1,017	2,861	2,828	20,40	20,45	0,722
80	0,968	1,021	2,931	2,958	20,99	21,70	0,722
90	0,942	1,021	3,000	3,125	21,57	22,90	0,722
100	0,916	1,021	3,070	3,278	21,77	23,78	0,722

Příloha 2 – Fyzikální vlastnosti vody

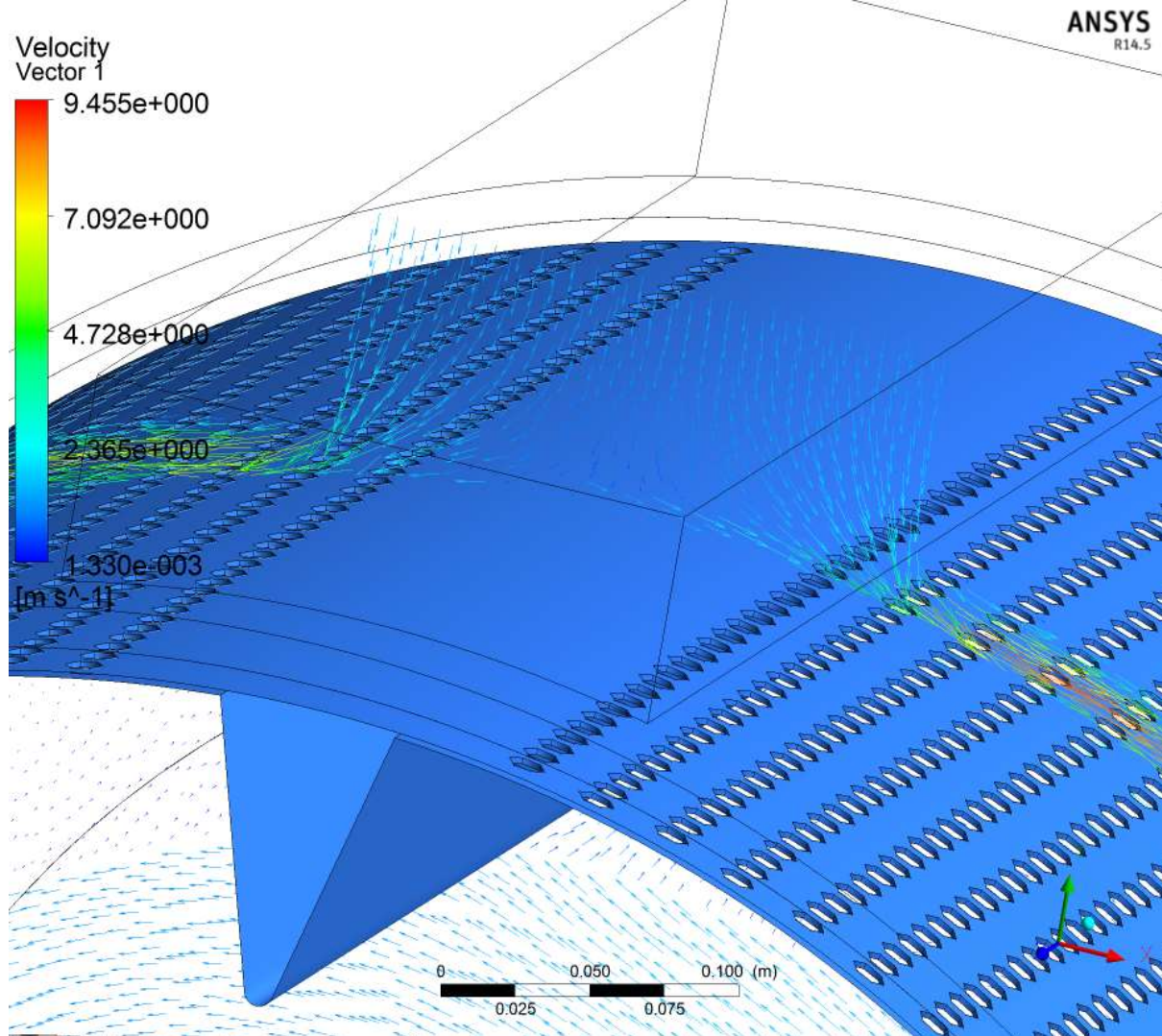
T [°C]	ρ [kg/m ³]	c_p [kJ/kg/K]	λ [W/m/K]	γ [K ⁻¹]	$\eta \cdot 10^6$ [Ns/m ²]	$\nu \cdot 10^6$ [m ² /s]	Pr
0	999,9	4,2257	0,558	-	1793,6	179,4	13,57
5	1000	4,2065	0,567	0,000015	1534,7	153,5	11,35
10	999,7	4,1947	0,577	0,000090	1296,4	129,7	9,42
15	999,1	4,1868	0,587	0,000154	1135,6	113,7	8,10
20	998,2	4,1817	0,597	0,000208	993,4	99,6	6,97
25	997,1	4,1784	0,606	0,000256	880,6	88,4	6,08
30	995,7	4,1763	0,615	0,000302	792,4	79,6	5,38
35	994,1	4,1755	0,624	0,000344	719,8	72,4	4,81
40	992,3	4,1755	0,633	0,000386	658,0	66,3	4,34
45	990,2	4,1763	0,639	0,000422	605,1	61,1	3,94
50	988,1	4,1776	0,647	0,000457	555,0	56,2	3,58
55	985,7	4,1793	0,652	0,000490	509,9	51,8	3,27
60	983,2	4,1816	0,658	0,000522	471,7	48,0	2,99
65	980,6	4,1839	0,663	0,000554	435,4	44,4	2,74
70	977,8	4,1868	0,667	0,000584	404,0	41,3	2,53
75	974,9	4,1901	0,651	0,000614	376,6	38,6	2,35
80	971,8	4,1939	0,673	0,000642	352,0	36,2	2,19
85	968,7	4,1977	0,676	0,000670	328,1	33,29	2,04
90	965,3	4,2019	0,678	0,000697	308,9	32,0	1,91
95	961,9	4,2060	0,680	0,000723	292,9	30,4	1,80
100	958,4	4,2107	0,681	0,000749	277,5	29,0	1,72

Příloha 3 – Vizualizace výsledků CFD analýzy

- Proudnice zbarvené podle velikosti rychlosti

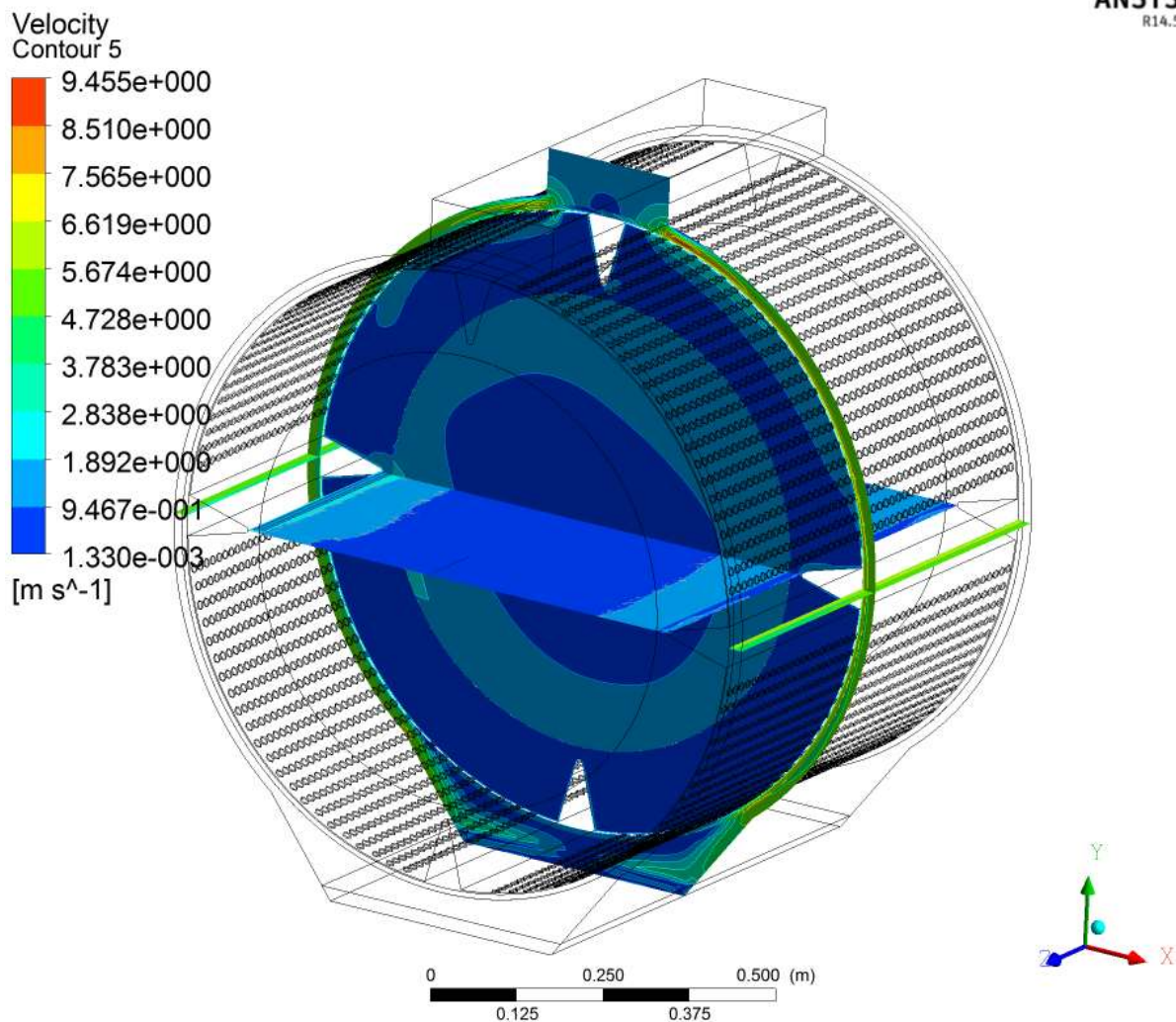


- Vektory proudění zbarvené podle rychlosti



- Contury rychlosti

ANSYS
R14.5



- Contury intezity turbulence

ANSYS
R14.5

Turbulence Intensity
Contour 3

