

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra energetických zařízení



Přenosové jevy při sušení plošných textilních materiálů

Disertační práce

Transfer phenomena when drying flat textile materials

Ph.D. Thesis

Liberec 2013

Jaroslav Fábera

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra energetických zařízení

Disertační práce

k získání akademického titulu Doktor (Ph.D.)

ve studijním oboru

Konstrukce strojů a zařízení

Přenosové jevy při sušení plošných textilních materiálů

Transfer phenomena when drying flat textile materials

Ing. Jaroslav Fábera

Školitel:	prof. Ing. Karel Adámek, CSc.
Studijní program:	P 2302 Stroje a zařízení
Studijní obor:	2302V010 Konstrukce strojů a zařízení
Studijní zaměření:	Tepelná technika
Školící pracoviště:	Katedra energetických zařízení
Datum odevzdání disertační práce:	
Datum státní doktorské zkoušky:	

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat především mé rodině a obzvláště mé ženě Adéle za trpělivost, shovívavost a porozumění, což bylo pro mě podporou při studiu. Velký dík patří vedoucímu mé disertační práce Prof. Ing. Karlu Adámkovi, CSc. za věcné připomínky a rady, které mi byly výraznou pomocí. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Milanu Stejskalovi, CSc. za odborné vedení a časový prostor potřebný k vytvoření této práce na pracovišti. Dále děkuji vedení VÚTS a.s. Liberec za vytvoření podmínek podporujících postgraduální studium. A v neposlední řadě děkuji všem pracovníkům TU v Liberci, kteří mi pomáhali ve studiu a to ať po stránce odborné nebo administrativní. Ještě jednou všem děkuji.

Autor:

Prohlášení autora o původnosti disertační práce

Prohlašuji, že jsem svoji disertační práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací se školitelem a odborníky v řešené problematice, a všechny prameny jsem důsledně citoval.

..... . Jaroslav Fábera, v.r.

Prohlášení k využívání výsledků disertační práce

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména §60 (školní dílo) a §35 (o nevýdělečném využití díla k vnitřní potřebě školy).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé disertační práce a prohlašuji, že souhlasím s případným užitím mé disertační práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své disertační práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

..... . Jaroslav Fábera, v.r.

Anotace

V práci jsou popsány různé způsoby sušení plošných textilních materiálů. Blíže se práce zabývá impaktním sušením. Je zde popsána podstata sušení z hlediska vazby vody v materiálu, energetická bilance impaktní sušárny a přenos tepla a hmoty v textilních materiálech. Práce se věnuje návrhu nové tryskové komory, která je následně použita v impaktní části mikrovlnné sušárny. Práce obsahuje měření rovnoměrnosti sušení pomocí termokamery a měření měrné odpařivosti hmotnostní metodou. Dále jsou v práci uvedeny výsledky použití mechanických oscilátorů impaktních proudů instalovaných do porovnávací tryskové komory. Práce dále popisuje ladění optimálních parametrů rezonanční komory mikrovlnné části sušárny Impact Wave a efektivnost impaktní části této sušárny.

Klíčová slova

Přenos tepla a hmoty, sušení, rychlost sušení, měrná odpařivost, impaktní sušení, mikrovlnné sušení, sušení plošných textilních materiálů, oscilátor.

Annotation

The paper describes the various methods of drying flat textile materials. It is dealt more closely with impact drying. Here, it is depicted the principle of drying in terms of water binding in the material, energy balance of impact dryer, and heat and mass transfer in textile materials. A new jet chamber is designed, which is then used in the impact part of the microwave dryer. There are included measurements of drying uniformity using a thermal imager and measurements of specific evaporative capacity by mass method. Furthermore, the results of using impact jet mechanical oscillators installed in the comparative jet chamber are mentioned here. Debugging the optimal parameters of the resonant chamber of the microwave part of the Impact Wave dryer and the efficiency of the impact part of this dryer are presented here.

Heat transfer, mass transfer, drying, drying speed, specific evaporating capacity, impact drying, microwave drying, flat textile materials drying, oscillator.

Key Words

Heat transfer, mass transfer, drying, drying speed, specific evaporating capacity, impact drying, microwave drying, flat textile materials drying, oscillator.



Obsah:

OBSAH:	13
1 MOTIVACE PRÁCE:	15
2 TEORETICKÝ ÚVOD [1]:	17
2.1 Přirozené sušení [1].....	17
2.2 Umělé sušení [1].....	17
2.2.1 Odvodňování textilií [2].....	18
2.2.2 Termické sušení – principy [4].....	19
2.2.2.1 Sušárny s impaktním prouděním [5].....	20
2.2.2.2 Mikrovlnné sušárny – sušení plošných textilií [6].....	21
2.2.2.3 Sušárny s fluidním ložem [2].....	23
2.2.2.4 Odporový ohřev [8].....	24
2.2.2.5 Indukční ohřev [8].....	24
2.2.2.6 Kondukční ohřev [8].....	25
2.3 Podstata sušení [9].....	26
2.3.1 Sušicí křivky [9].....	26
2.3.1.1 Období konstantní rychlosti sušení [9].....	29
2.3.1.2 Období klesající rychlosti sušení [9].....	29
2.4 Energetická bilance tepla v sušárně [10].....	31
2.4.1 Energetické zhodnocení procesu sušení [10].....	31
2.4.2 Sušení v Mollierově diagramu [10].....	33
2.4.3 Oběhy sušáren [9].....	34
2.5 Přenos tepla a hmoty v textilních materiálech [1].....	37
2.5.1 Odpařování a vypařování (var) [1].....	37
2.5.2 Sdílení tepla a přenos hmoty při odpařování [1].....	37
2.5.3 Odpařování volné vody s přímkovým průběhem – úsek konstantní rychlosti sušení [1].....	44
2.6 Současný stav tryskových impaktních systémů a trendy vývoje.....	46
2.6.1 Volba proudění impaktních sušáren [11].....	46
2.6.2 Průzkum v oblasti impaktních tryskových systémů [5].....	47
3 PRAKTICKÁ ČÁST:	50
3.1 Konstrukční návrh porovnávacích tryskových systémů.....	50
3.1.1 Porovnávací tryskové systémy.....	51
3.1.1.1 Komora 1.....	51
3.1.1.2 Komora 2.....	52
3.1.1.3 Komora 3.....	52
3.1.1.4 Komora 4.....	53
3.2 Zkušební testovací sušárna.....	54
3.2.1 Ideový návrh zkušební testovací sušárny.....	54
3.2.2 Konstrukce zkušební impaktní sušárny.....	55
3.2.3 Metodika porovnání tryskových komor.....	59
3.2.4 Vyhodnocení měření.....	60
3.3 Návrh nové tryskové komory NK.....	67
3.3.1 Optimalizace geometrie soustavy trysek [5].....	67
3.3.1.1 Volba optimální rozteče trysek [5].....	67
3.3.1.2 Volba optimálního průměru trysky [5].....	68
3.3.2 Návrh nové soustavy [5].....	68
3.3.2.1 Počet trysek.....	68
3.3.2.2 Rozteč trysek.....	69
3.3.2.3 Počet trysek v jedné řadě.....	69
3.3.2.4 Počet řad v tryskové komoře.....	69
3.3.3 Základní rozměry tryskové komory NK.....	70
3.3.4 Návrh ústí trysky [16].....	71
3.3.5 Návrh odsávání z tryskové komory [16].....	75
3.3.6 Konstrukce nové tryskové komory NK.....	76
3.3.7 Experimentální stanovení parametrů komory NK.....	77
3.3.7.1 Měření rovnoměrnosti výtokových rychlostí.....	77
3.3.7.2 Měření závislosti výtokové rychlosti na otáčkách ventilátoru.....	78
3.3.8 Měření sušicích křivek.....	79
3.3.8.1 Podmínky měření sušicích křivek.....	79
3.3.8.2 Postup měření sušicích křivek.....	80
3.3.9 Diskuse výsledků návrhu nové komory NK.....	82



3.4 Tryskový systém vybavený pulsačním oscilátorem.....	84
3.4.1 Fluidický oscilátor [18].....	84
3.4.2 Mechanický oscilátor.....	85
3.4.3 Měření rychlosti sušení.....	86
3.4.4 Diskuse výsledků.....	90
3.4.5 Konstrukce soustavy mechanických oscilátorů.....	90
3.4.5.1 Konstruktivní uspořádání mechanických oscilátorů.....	90
3.4.5.2 Stanovení rychlosti sušení oscilujícími proudy.....	93
3.4.6 Diskuse výsledků.....	95
3.5 Impaktní dosušování v mikrovlnné sušárně [19].....	97
3.5.1 Sušárna ImpactWave.....	98
3.5.2 Postup měření měrné odpařivosti.....	99
3.5.3 Vyhodnocení měrné odpařivosti sušárny ImpactWave.....	101
3.5.4 Diskuse výsledků.....	102
4 ZÁVĚR.....	104
5 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	109
6 PŘEHLED UŽITÝCH ZNAČEK A OZNAČENÍ.....	112
7 SEZNAM ILUSTRACÍ.....	114
8 SEZNAM PŘÍLOH.....	116

1 Motivace práce

V provozech textilní výroby se často setkáváme s procesem sušení. Při sušení plošných textilních materiálů, kdy třetí rozměr materiálu je zanedbatelný vůči ostatním dvěma, je používáno v úpravářské oblasti textilní výroby především impaktních způsobů sušení. Energeticky jsou tyto technologické pochody velice náročné a při výrobě plošných textilních materiálů jsou z technologických důvodů výroby textilie včleněny do procesu i několikrát po sobě. Z důvodu vysoké energetické náročnosti tohoto procesu jsou ve VÚTS a.s. Liberec vyvíjena technická řešení vedoucí k zefektivnění stávajících tryskových systémů a návrhu nových způsobů sušení plošných textilních materiálů. Některé úkoly jsou řešeny v rámci projektu Výzkumného centra TEXTIL II (*kód projektu IM0553*) v sekci A – Textilní strojírenství a mechatronika, kde jsem se stal členem řešitelského týmu v projektech:

- „Optimalizace a inovace vybraných uzlů textilních strojů s dopadem na textilní procesy“, kde jsem se účastnil na vývoji nových tryskových systémů sušárenských strojů [A1], [A3], [A5], [A7], [A9], [A11], [A12].
- „Uplatnění nových fyzikálních metod při náhradě impaktního sušení plošných textilií“, kde jsem se podílel na vývoji souvisejícím s intenzifikací mikrovlnného sušení textilií [A2], [A4], [A6], [A8], [A10].

Návrh nové tryskové komory impaktní sušárny s parametry umožňující efektivní použití v impaktní části mikrovlnné sušárny spojené s návrhem experimentální impaktní sušárny se ukázal jako plnohodnotné téma disertační práce. Cíle práce lze shrnout do těchto bodů:

1. Rešerše fyzikálních metod použitelných pro sušení plošných textilních materiálů. Specifikace impaktního sušení z hlediska statiky a kinetiky procesu.
2. Rešerše současného stavu tryskových systémů s ohledem na intenzifikaci přenosových veličin.
3. Konstrukční návrh a realizace experimentální sušárny pro možnost ověření numerických simulací prováděných při návrhu nové tryskové komory.
4. Konstrukční návrh a realizace nové tryskové komory a ověření numerických simulací nové tryskové komory.

5. Ověření zvýšení účinnosti procesu sušení mikrovlnné sušárny rozšířením o impaktní část využívající pro ohřev vzduchu odpadní teplo z chladičů generátorů mikrovlnného záření.

Jednotlivé body jsou dále řešeny v jednotlivých kapitolách. Hlavní dělení kapitol je rozděleno na teoretickou část a na praktickou část. Kde v teoretické části jsou uvedeny výsledky rešerší a v praktické části pak je vlastní realizace návrhů a prováděné experimentální ověření výsledků těchto návrhů.

2 Teoretický úvod [1]

Sušením rozumíme fyzikální děj, při němž se účinkem tepla snižuje obsah kapaliny v látkách, aniž se mění jejich chemické složení. Vlhkost se odstraňuje vypařováním, odpařováním nebo sublimací. Tato definice rozlišuje sušení, kde dochází ke změně fáze odstraňované kapaliny, zásadně od mechanických nebo chemických metod odstraňování kapaliny, kde ke změně fáze nedochází.

Mechanické odstraňování je málo vhodné tam, kde jde o látky s jemnými póry a látky, které kapalinu, nejčastěji vodu, váží chemicky.

Pokud je však možno použít mechanických způsobů odstraňování vody, jsou z hlediska spotřeby energie zpravidla daleko výhodnější. Pak dochází k různým kombinacím technických prostředků a mechanické odstraňování kapaliny se předřazuje před vlastní sušení. Větší část vody se odstraní „levně“ mechanicky a teprve odstranění zbytku vody na předepsanou vlhkost se provede sušením.

Materiál můžeme sušit buď přirozeným, nebo umělým způsobem.

2.1 Přirozené sušení [1]

Přirozeně lze sušit materiál pod přístřeškem, na volném vzduchu, nebo přímo na slunci. Voda se na povrchu odpařuje a pára difunduje do okolního vzduchu. Podrobíme-li však proces ekonomické úvaze, zjistíme, že výhodnost je ve většině případů sporná. Hlavní nevýhodou přirozeného sušení je jeho malá rychlost, která je příčinou potřeby velkých ploch a prostorů, které jsou čím dále tím nákladnější. Náklady na potřebu energie prakticky odpadá, zato se zvyšují náklady na dopravu a manipulaci.

2.2 Umělé sušení [1]

Umělé sušení se provádí ve speciálních strojních zařízeních – sušárnách. Při sušení probíhají současně 2 základní pochody:

- **Sdílení tepla** – za účelem přeměny kapaliny v páru
- **Přenos hmoty** – tj. vodní páry z povrchu sušené látky mezní vrstvou do okolního sušicího prostředí.

Na rozdíl od řady jiných dějů, kde dochází k přenosu hmoty (rektifikace, absorpce, extrakce) jsou poměry při sušení zvláště komplikované, neboť fyzikální podmínky se v průběhu sušení většinou mění.

2.2.1 Odvodňování textilií [2]

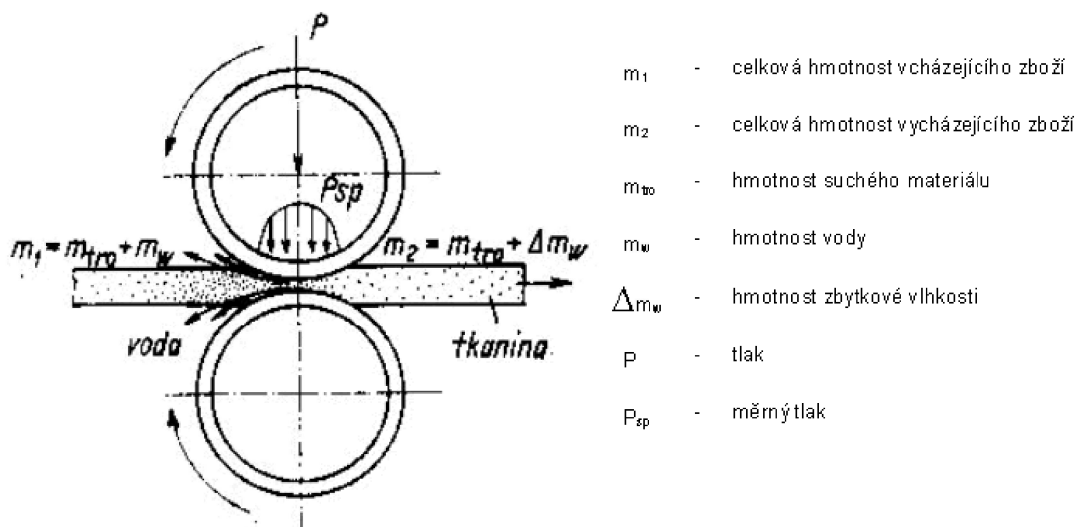
Odvodňováním textilií je míněno intenzivní snížení její vlhkosti procesy, které probíhají za teploty okolí eventuálně za mírně zvýšené teploty. Před vlastním sušením je vždy prováděno odvodňování textilie. Vlhkost textilie je definována výrazem:

$$u = \frac{(\text{hmotnost kapaliny})}{(\text{hmotnost suché textilie})} \cdot 100 \text{ [\%]} \quad (\text{rov } 1)$$

Pro odvodňování plošných textilií se používají, následující zařízení:

- *Tlaková – mechanická*
- *Plynokinetická*
- *S kapilárním účinkem*

Nejběžněji se používají tlaková – mechanická zařízení (ždímadla, fuláry), pokud to povaha odvodňovaných materiálů dovolí. V této skupině se jedná o zařízení využívající k dosažení velkého stupně a rovnoměrnosti odvodnění různých válců s různými povlaky, které jsou k sobě přitlačovány např. pneumaticky (obrázek 1).



Obrázek 1: Princip strojního odmačkávání (fulár) [3]

Příkony těchto strojů jsou podstatně menší než příkony sušáren. Průchodem textilie mezi válci dochází pak k odvodňování. Důležitým faktorem je zde rovnoměrnost odvodnění, ta je závislá především na průhybu válců, tudíž i na přitlačné síle. Nicméně je možné vhodnou konstrukcí docílit zvýšení odvodnění a tím následně uspořit tepelný výkon potřebný pro sušení termické.

Teoreticky lze úsporu tepelného výkonu při vlastním sušení efektivnějším odvodněním vyjádřit následovně:

$$Q_0 = 1,667 \cdot 10^{-7} \cdot q_c \cdot g_m \cdot v_m \cdot s \cdot (u_1 - u_2) \quad (\text{rov } 2)$$

Q_0 – tepelný výkon k usušení textilie o vlhkosti po odvodnění na rovnovážnou vlhkost [kW]

q_c – teplo potřebné k odpaření 1kg vody [kJ·kg⁻¹]

g_m – plošná hmotnost textilie [g·m⁻¹]

v_m – rychlost pohybu textilie [m·min⁻¹]

s – šíře textilního pásu [m]

u_1 – vlhkost materiálu před vstupem do sušárny [%]

u_2 – výstupní rovnovážná vlhkost [%]

Při snížení vstupní vlhkosti z u_1 na u_i můžeme vyjádřit úsporu tepla:

$$\Delta Q = Q_0 - Q_i = 1,667 \cdot 10^{-7} \cdot q_c \cdot g_m \cdot v_m \cdot s \cdot [(u_1 - u_2) - (u_i - u_2)]$$

$$\Delta Q = 1,667 \cdot 10^{-7} \cdot q_c \cdot g_m \cdot v_m \cdot s \cdot (u_1 - u_i)$$

Jestliže se podaří odvodnit plošnou textilií o několik procent více, výsledný efekt potřebného tepelného výkonu bude následující:

Tepelný výkon pro usušení textilie odvodněné fulárdem:

$$q_c = 3500 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad g_m = 140 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \quad v_m = 35 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$s = 1 \text{ m} \quad u_1 = 65 \% \quad u_2 = 8 \%$$

$$\Delta Q = 1,667 \cdot 10^{-7} \cdot q_c \cdot g_m \cdot v_m \cdot s \cdot (u_1 - u_2) = 163 \text{ kW}$$

Například odvodněním textilie pomocí účinnějšího systému se sníží vstupní vlhkost fulárdová $u_1 = 65 \%$ na hodnotu $u_i = 40 \%$, což činí úsporu cca:

$$\Delta Q = 1,667 \cdot 10^{-7} \cdot q_c \cdot g_m \cdot v_m \cdot s \cdot (u_1 - u_i) = 71,5 \text{ kW}$$

Z tohoto rozboru je zřejmé, že intenzivnějším odvodněním lze snížit významným způsobem celkovou spotřebu energie následného procesu sušení.

2.2.2 Termické sušení – principy [4]

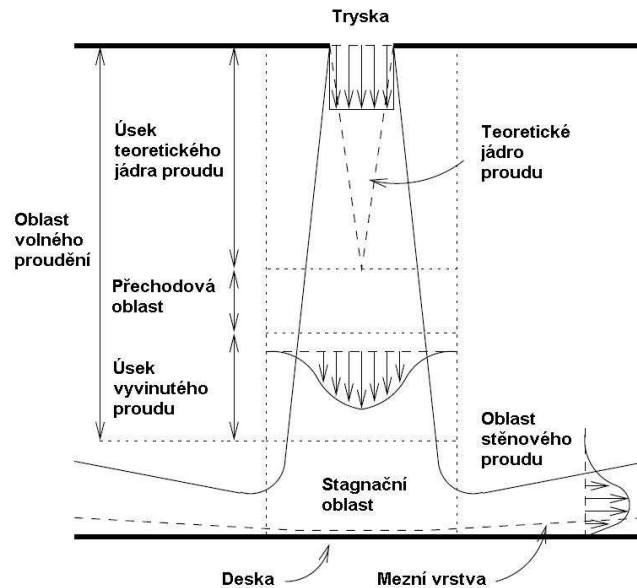
Podle přívodu energie potřebné k odpaření přebytečné vody v textilií rozeznáváme několik základních typů sušáren. Jedná se především o:

- Sušárny s impaktním prouděním
- Mikrovlnné sušárny
- Sušárny s fluidním ložem
- Odporové sušárny

- Indukční sušárny
- Kondukční sušárny

2.2.2.1 Sušárny s impaktním prouděním [5]

Impaktní proudění je charakterizováno kolmým dopadem volných proudů na stěnu. Podle obrázku 2 je v oblasti teoretického jádra proudu rychlost w_{max} v ose trysky rovna výtokové rychlosti v ústí trysky w_0 .

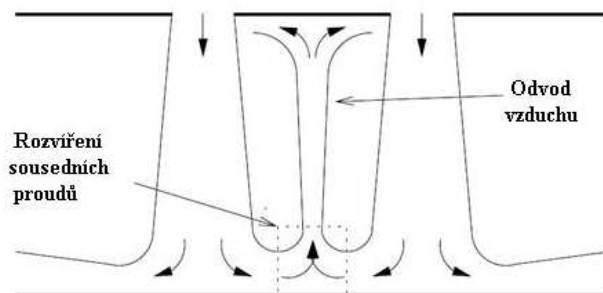


Obrázek 2: Impaktní proud a jeho oblasti

V místě kdy směšování volného proudu s okolním prostředím zasáhne osu proudu, začíná klesat v ose proudu rychlost w_{max} . Začínají se vytvářet typické rychlostní profily, které jsou zobrazeny v oblasti vyvinutého proudu. Dalším postupem proudu k textilií se jejím účinkem proud deformuje až je v stagnační oblasti rychlost v ose proudu nulová. Poté se začne vyvíjet stěnový (podélný) proud ve vodorovném směru, přičemž vývoj rychlosti je lineární. Po dosažení maximální rychlosti ve vodorovném směru začíná vlivem směšování s okolním prostředím rychlost opět klesat.

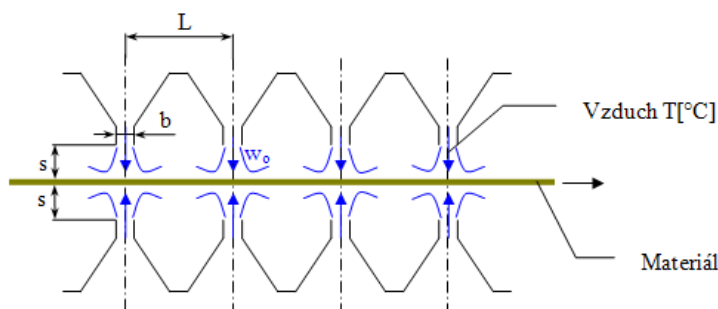
Zvýšení intenzity sušení je dáno především:

- *Rozrušením mezní vrstvy v místě dopadu volných proudů*
- *Vytváření mezní vrstvy pouze na krátkých drahách*
- *Rozvíření mezní vrstvy vlivem sousedních proudů (obrázek 3)*



Obrázek 3: Proudění dvou sousedících impaktních proudů

V případě více proudů v soustavě, tak jak je v sušárnách běžné, dochází k vzájemnému působení sousedních proudů. Principiálně je tryskový systém uveden na obrázku 4.



Obrázek 4: Tryskový systém pro impaktní sušení

2.2.2.2 Mikrovlnné sušárny – sušení plošných textilií [6]

V průmyslu se mikrovlnné energie využívá mimo jiné pro ohřev a vysoušení různých materiálů. Výhodou takového ohřevu je přímé působení na celý objem materiálu jako na ztrátové dielektrikum, kde se vysokofrekvenční energie absorbuje a mění v teplo. Eliminuje se tak problematika způsobená vedením tepla a hmoty.

Navrhnout mikrovlnnou sušárnu znamená vyřešit elektromagnetické pole uvnitř sušárny s ohledem na maximální absorbovaný výkon. Elektromagnetické pole popisují Maxwellovy rovnice:

Hlavní Maxwellovy rovnice – vyjadřují vazbu mezi elektrickým a magnetickým polem.

$$\text{rot } \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}_v \quad (\text{rov } 3)$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (\text{rov } 4)$$

Doplňující Maxwellovy rovnice – umožňují určit počáteční a okrajové podmínky.

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad (\text{rov } 5)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (\text{rov } 6)$$

Materiálové rovnice – umožňují řešit Maxwellovy rovnice v nehomogenním prostředí.

$$\mathbf{D} = \varepsilon \cdot \mathbf{E} \quad (\text{rov } 7)$$

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} \quad (\text{rov } 8)$$

$$\mathbf{J}_v = \delta \cdot \mathbf{E} \quad (\text{rov } 9)$$

\mathbf{H} – vektor intenzity magnetického pole [$A \cdot m^{-1}$]

\mathbf{E} – vektor intenzity elektrického pole [$V \cdot m^{-1}$]

\mathbf{D} – vektor indukce elektrického pole [$C \cdot m^{-2}$]

\mathbf{B} – vektor indukce magnetického pole [$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$]

\mathbf{J}_v – vektor hustoty vodivého proudu [$A \cdot m^{-2}$]

t – čas [s]

ρ – hustota volného prostorového náboje [$C \cdot m^{-3}$]

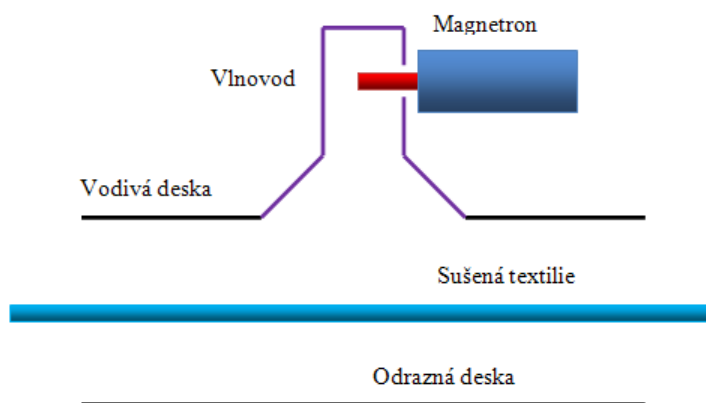
ε – permitivita prostředí [$F \cdot m^{-1}$]

μ – permeabilita prostředí [$H \cdot m^{-1}$]

δ – měrná elektrická vodivost prostředí [$\Omega \cdot m^{-1}$]

Standardně se používají mikrovlnné sušárny pro sušení silnějších materiálů, pro plošné textilie je problematické docílit vyšších účinností. Výhody mikrovlnných sušáren se využívají například při sušení dřeva nebo po nedávných povodních při sušení historických knih. V textilu je například možné sušit touto metodou plstěné materiály, křížem soukané cívky.

Principiální uspořádání mikrovlnné sušárny plošných textilií využívající odrazné desky ke zvýšení účinnosti je zobrazeno na obrázku 5. ([7]). Vzdálenost mezi vodivou deskou a odraznou deskou je volena s ohledem na vytvoření rezonančního stavu soustavy.



Obrázek 5: Princip mikrovlnné sušárny plošných textilií [7]

Energie generovaná magnetronem je vedena vlnovodem k textilii (dielektriku), kde se část energie pohltí (absorbuje), část se odrazí a část projde. Pohlcená energie se přeměňuje v teplo. Tímto způsobem je možné ohřát celý objem materiálu zevnitř, aniž by se využívalo principu vedení tepla tak, jak je běžné v klasických sušárnách. Energie, která nebyla pohlcena, je dále vedena k vodivé desce eventuálně k odrazné desce, kde se odrazí zpět k textilii, aby byla její část opět pohlcena v dielektriku a následně přeměněna v teplo.

Vhodným návrhem rezonující soustavy lze dosáhnout zajímavých účinností absorpce výkonu v textilii. Velkou nevýhodou mikrovlnných sušáren je však nízká účinnost samotného generátoru mikrovlnné energie (magnetronu), kde se dosahuje účinnosti kolem 60 %. Teplo vzniklé na magnetronu je nutné odvést, a tudíž se nabízí otázka, zda by se toto nízkopotenciální teplo nedalo využít dále například k sušení klasickým (impaktním) způsobem (řešeno v *VC Textil II* – [A2], [A4], [A6], [A8], [A10]).

2.2.2.3 Sušárny s fluidním ložem [2]

Vysoké intenzity odpařování je dosahováno tím, že ohřívanou textilii vedeme fluidním ložem pevných částic. Fluidní vrstva může být tvořena například pískem eventuálně skleněnými kuličkami o průměru $d_f = 0,1 \div 1 \text{ mm}$. Výhody větších přestupních součinitelů jsou však doprovázeny problematickým sekundárním znečištěním textilie ulpívajícími kuličkami. Toto znečištění způsobuje z hlediska technologického problémy například při následném barvení, z hlediska strojního způsobuje poškození například kalandrovacích nebo fulardových válců.

Při sušení ve fluidní vrstvě může být celý proces provozován na nižších teplotních úrovních (cca 110 °C) při zachování vyšších intenzit odpařování (cca 2x) oproti klasickému impaktnímu sušení.

Součinitel přestupu tepla při sušení ve fluidní vrstvě je dán empirickým vyjádřením [2]:

$$\alpha_{max} = 33,7 \cdot \rho_f^{0,2} \cdot \lambda_v^{0,6} \cdot d_E^{-0,36} \quad (\text{rov } 10)$$

ρ_f – měrná hmotnost částic [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

λ_v – tepelná vodivost tekutiny [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

d_E – ekvivalentní průměr částic mající stejné hydrodynamické vlastnosti jako kulička o průměru d_f [mm]

Naměřené hodnoty součinitele tepla bývají menší, než uvádí empirický vzorec, a to v závislosti na plošné hustotě textilie:

$$\alpha = 0,8 \cdot \alpha_{max} \quad \text{pro } g_m < 300 \quad [\text{g} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (\text{rov } 11)$$

$$\alpha = 0,5 \cdot \alpha_{max} \quad \text{pro } g_m > 300 \quad [\text{g} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (\text{rov } 12)$$

Součinitel přenosu tepla eventuálně hmoty je závislý především na:

- *Rychlosti proudění tekutiny*
- *Průměru částic*
- *Výšce fluidní vrstvy*
- *Fyzikálních vlastnostech fluidní suspenze*
- *Geometrickém tvaru a jakosti povrchu částic*

2.2.2.4 Odporový ohřev [8]

Při odporovém ohřevu je elektrický proud přiváděn přímo do sušeného materiálu, ve kterém se dodaná energie mění v teplo. Využití tohoto způsobu ohřevu je opět využíváno u silnějších materiálů. Výhodou tohoto způsobu je souhlasný spád vlhkosti a teploty. Teplo přivedené do materiálu je funkcí napětí elektrického proudu a odporu materiálu. Odpor materiálu závisí na tloušťce materiálu a jeho měrném odporu, který je závislý na vlhkosti sušeného materiálu, tedy se v průběhu sušení mění. Závislost měrného odporu na vlhkosti je pro různé materiály rozdílná.

2.2.2.5 Indukční ohřev [8]

Tento způsob ohřevu je založen na přívodu tepla do materiálu od feromagnetických elementů umístěných i s ohříváním materiálem v proměnném elektromagnetickém poli vytvořeném solenoidem připojeným na zdroj střídavého elektrického proudu. Teplo, které se indukuje ve feromagnetických elementech se ohřívávanému materiálu

přivádí kondukcí. Výhody tohoto způsobu jsou rovnoměrný ohřev, vysoká účinnost, snadná regulace a jednoduchá konstrukce.

2.2.2.6 Kondukční ohřev [8]

Kondukčního ohřevu se užívá u válcových vytápěných sušáren. Pro porovnání jednotlivých sušáren se používá měrného výkonu vztaženého na *1 hodinu* provozu *1 m* dlouhého válce. Standardní průměr válcových sušáren je $D = 560 \text{ mm}$.

Použití kondukčního ohřevu s konvekčním se dociluje až *30%* zvýšení měrných výkonů. K takovému zvýšení postačuje, aby válce byly ofukovány volnými proudy, které proudí rovnoběžně s pláštěm válců ze štěrbin. Tyto štěrbin jsou umístěny v blízkosti obou čel válců.

2.3 Podstata sušení [9]

Průběh rychlosti sušení je závislý z velké části na vazbě vypařované vody se sušeným materiálem. Voda spojená s materiálem adhezí (přilnavostí) je převážně na povrchu. Při vypařování adhezně vázané vody odpovídá každé teplotě zcela určitý tlak páry, který je roven napětí páry kapaliny při dané teplotě.

Při vypařování vody, která je s materiálem spojena kapilárními silami, je nezbytné, aby tato voda měla poněkud vyšší teplotu než je bod jejího varu při daném tlaku.

Volná vlhkost, je-li v materiálu obsažena, přechází do okolí tehdy, jestliže je tlak páry nad povrchem vlhkého materiálu p_1 větší, než jeho parciální tlak p_2 v okolním prostředí, tj.:

$$p_1 > p_2 \quad (\text{rov } 13)$$

Sušení bude probíhat do okamžiku, kdy se tlaky páry nad materiálem a ve vzduchu navzájem vyrovnají, tj.:

$$p_1 = p_2 \quad (\text{rov } 14)$$

Vlhkost tenké vrstvy materiálu, při níž nastává rovnováha mezi tlakem páry na povrchu materiálu a parciálním tlakem páry v okolním vzduchu, se nazývá vlhkost rovnovážná u_r nebo stálá. Jestliže je tlak páry nad povrchem materiálu menší než parciální tlak okolní atmosféry, nastane obrácený pochod sušení, kdy:

$$p_1 < p_2 \quad (\text{rov } 15)$$

a daný materiál bude samovolně vlivem svého hygroskopického efektu absorbovat vlhkost z okolí. Hygroskopický materiál bude pohlcovat vlhkost ze vzduchu až dosáhne rovnovážné vlhkosti u_r při sušení. Takovýmto způsobem se při rozdílu parciálních tlaků páry nad materiálem a ve vzduchu vypařuje vlhkost z povrchu materiálu.

2.3.1 Sušicí křivky [9]

Rychlost sušení se v průběhu celého pochodu nepřetržitě mění v závislosti na ubývání obsahu vlhkosti sušeného materiálu. Přitom ve většině případů odevzdává vlhký materiál svoji vlhkost z počátku rychleji než na konci, takže se rychlost sušení mění v průběhu celého sušicího pochodu. Při výpočtu sušáren je nutné znát funkční závislosti sušení na čase, které jsou dány jednak tzv. sušicí křivkou a dále křivkou rychlosti sušení. Tato závislost je poměrně složitá, a proto v praxi nezbyvá než závislost

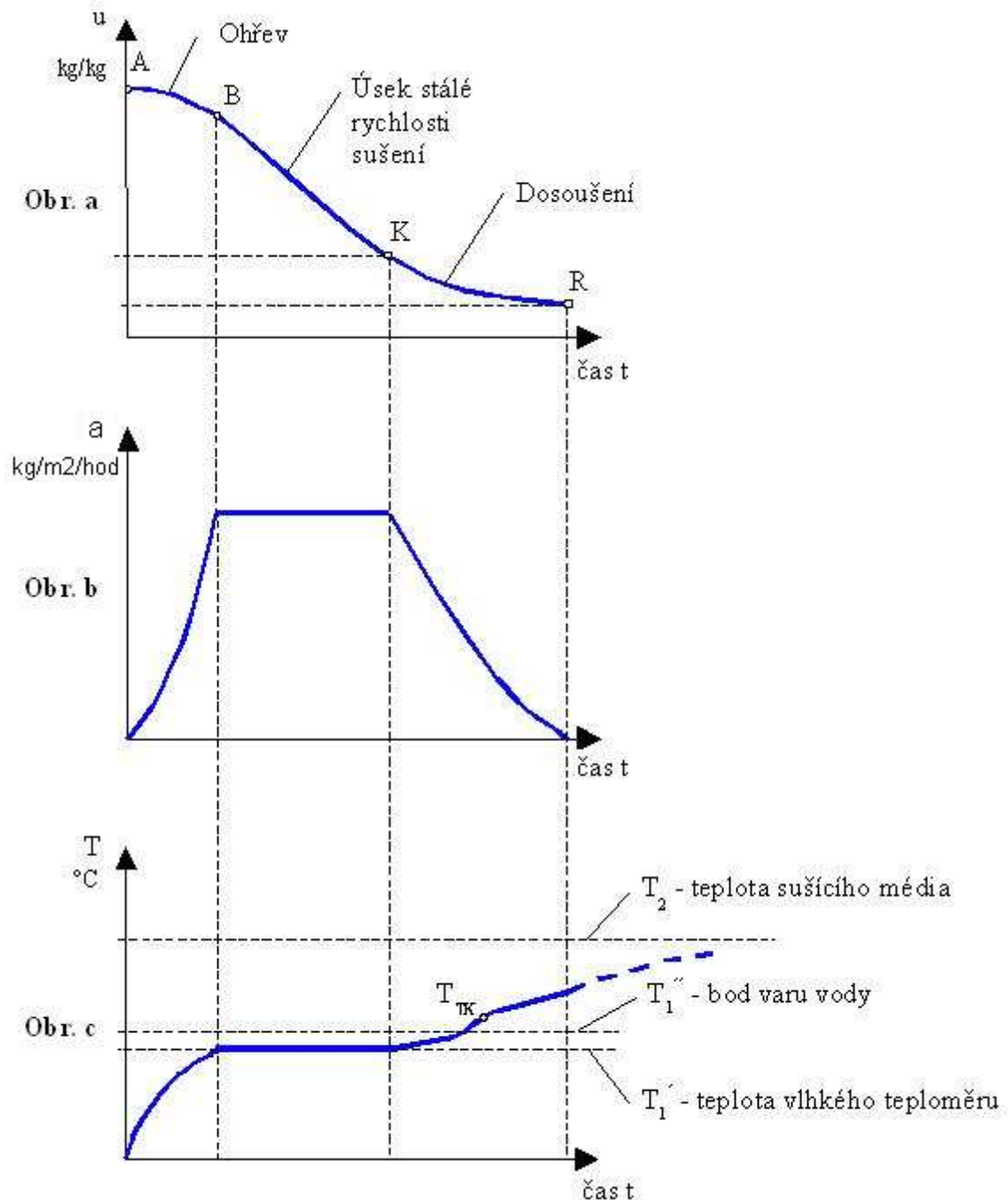
mezi vlhkostí a dobou sušení vyjádřit na základě experimentálního šetření graficky. Grafické zpracování se provádí ve tvaru sušicích křivek a křivek rychlosti sušení v souřadnicích, kdy na osu „x“ je vynášena doba sušení a na osu „y“ je vynášena vlhkost materiálu při určitých tepelných podmínkách.

Rychlost sušení závisí na velkém počtu činitelů, které prakticky není možné spojit v jeden celek ve tvaru určité funkce. Nejdůležitější činitele jsou následující:

1. Přirozená povaha materiálu, jeho struktura, chemické složení, způsob spojení s vlhkostí aj.
2. Tvar sušeného materiálu – rozměry jeho částí, tloušťka vrstvy atd. Za jinak stejných podmínek je možné předpokládat, že rychlost sušení je úměrná povrchu struktury sušeného materiálu k jeho objemu. Čím větší je povrch sušeného materiálu, tím rychleji probíhá sušení.
3. Počáteční a konečný obsah vlhkosti materiálu a jeho kritický obsah vlhkosti, poněvadž na nich závisí pokles rychlosti sušení s časem.
4. Rychlost, teplota a vlhkost vzduchu. Čím vyšší je teplota, čím větší je rychlost vzduchu a čím menší je jeho relativní vlhkost, tím rychleji probíhá sušení. Nesmíme však opomenout, že přípustná teplota a rychlost sušicího vzduchu závisí na vlastnostech a tvaru sušeného materiálu.
5. Způsob a podmínky, za jakých vzduch proudí kolem materiálu.
6. Volba sušicího prostředku. Použití sušicího prostředku o vyšší teplotě umožňuje často značně zkrátit dobu sušení.
7. Rozdíl teplot sušicího prostředku na vstupu a výstupu ze sušárny. Čím menší je teplotní spád, tím vyšší je střední teplota a proto i rychlost sušení.
8. Stejneměrnost sušení. Tento činitel má podstatný význam tam, kde je třeba dosáhnout žádaného obsahu vlhkosti v sušeném materiálu, neboť prodlouží-li se sušení jedné části, mohou se přesušit ostatní části materiálu.
9. Konstrukce sušárny, pokud na ní závisí uvedení činitelů.

Z výše uvedených důvodů je třeba v praxi vycházet při výpočtu a konstrukci sušáren z údajů získaných pokusy stanovených pro každý jednotlivý případ.

Na obrázku 6. jsou naznačeny sušicí křivky a to tak, že na ose úseček „x“ je v jednotném měřítku uvedena doba sušení, kdežto na pořadnici „y“ na obrázku 6-a) daná vlhkost materiálu.



Obrázek 6: Sušicí křivka, rychlost sušení a teplota materiálu během sušení

Na obrázku 6-b) je rychlost sušení vyjádřena jako derivace úbytku vlhkosti v čase a na obrázku 6-c) je odpovídající teplotní průběh sušeného materiálu pro sušení v podmínkách horkovzdušné sušárny při daném atmosférickém tlaku.

Výchozí křivkou je sušicí křivka, na které můžeme sledovat tři hlavní úseky. První úsek, mezi bodem A a B představuje nepatrný úbytek vlhkosti v době, kdy je materiál ohříván na vyšší teplotu, při které nastává odpařování. Tento úsek bude tím delší, čím tlustší a kompaktnější bude sušený materiál a čím vyšší bude počáteční vlhkost materiálu. U zvláště tenkých materiálů je možno prakticky tento úsek sušicí křivky zanedbat.

Úsek mezi bodem *B* a *K*, tzv. kritickým bodem, představuje oblast konstantní rychlosti sušení. Za kritickým bodem, který odpovídá kritické střední vlhkosti materiálu, následuje poslední období, tj. období klesající rychlosti sušení.

2.3.1.1 Období konstantní rychlosti sušení [9]

Na počátku sušení je rychlost vnitřní difúze v látce ve srovnání s rychlostí vnější difúze velká a z vnitřku materiálu postupuje k jeho povrchu dostatečné množství vlhkosti. Proto je sušení v období konstantní rychlosti úplně podmíněno rychlostí vypařování vlhkosti z volného povrchu sušeného materiálu.

V období konstantní rychlosti sušení se tlak páry nad povrchem materiálu rovná jeho tlaku nad čistou kapalinou a rychlost sušení nezávisí ani na tloušťce vrstvy materiálu, ani na jeho počátečním obsahu vlhkosti, nýbrž pouze na teplotním stavu sušení. Toto období trvá až do prvního kritického bodu a vlhkost povrchu je nižší než příslušná hygroskopická vlhkost. Střední celková vlhkost materiálu na konci tohoto období je první kritická vlhkost u_{kl} .

Povrch vypařování materiálu s kapilárními póry se prohlubuje směrem dovnitř k odkrytým makropórům a v tomto případě je povrch vypařování větší, než odpovídá příslušnému geometrickému povrchu. Intenzita sušení však zůstává konstantní, jen intenzita odpařování vody z volného povrchu je větší. Rychlost v tomto období tedy závisí na teplotním a vlhkostním gradientu mezi povrchem materiálu a vzduchem jej obklopujícím a je dána především parametry sušicího prostředí a hydrodynamickými podmínkami proudění.

Vnější difúze dává podmínky i pro vnitřní přemístění vlhkosti. Jestliže je teplo předáváno sušené látce pouze konvekcí vzduchu, je teplota materiálu konstantní a odpovídá teplotě mokrého teploměru. Přistupuje-li však vedle sušení konvekcí vzduchu též zahřívání přímo cizími tělesy, majícími poměrně vyšší povrchovou teplotu, je teplota materiálu vyšší než teplota vlhkého vzduchu.

2.3.1.2 Období klesající rychlosti sušení [9]

V průběhu tohoto období sušení je naopak rychlost sušení úplně podmíněna rychlostí difúze vláhly z vnitřku materiálu k jeho povrchu. Proto v tomto období závisí rychlost sušení na tloušťce vrstvy sušeného materiálu a na jeho obsahu vlhkosti a nezávisí na rychlosti vzduchu a jeho vlhkosti.

Povrch materiálu v tomto období je (částečně na začátku a úplně na konci) v hygroscopickém stavu. Za druhým kritickým bodem, kdy materiál má pouze adsorbovanou vlhkost, se povrchová vlhkost rovná vlhkosti rovnovážné:

$$u_p = u_r \quad (\text{rov } 16)$$

Rychlost sušení ubývá po křivce (obrázek 6 -b) a je nulová při celkové rovnovážné vlhkosti materiálu R .

Jak je patrné z křivky na diagramu obrázek 6-c, v období klesající rychlosti sušení teplota látky postupně vzrůstá a přitom se vytvoří v průřezu materiálu teplotní spád. Vzrůst teploty materiálu v tomto intervalu se vysvětluje zmenšením množství tepla potřebného k odpařování vody při snižující se rychlosti sušení. Parciální tlak páry při povrchu se zmenšuje, zůstává však stále vyšší než v okolním vzduchu. Teprve při rovnovážné vlhkosti materiálu se tlaky vyrovnají. Teplotní křivka na obrázku 6-c v prvním období udává ohřev sušeného materiálu, kdy teplota zpočátku prudce vzrůstá, postupně se ustaluje na určité teplotě, která zůstává po dobu celého úseku konstantního sušení téměř beze změny. Tato teplota je totožná s teplotou tzv. vlhkého teploměru. Teplota vlhkého teploměru závisí na řadě různých činitelů jako je teplota, tlak, rychlost a směr pohybu vzdušiny kolem sušeného materiálu. Je vždy nižší než teplota nasycených par při daném okolním tlaku a její odchylka, tzv. psychrometrická diference, je úměrná rozdílu mezi nasyceným vzduchem a danou relativní vlhkostí. V případě, že sušící vzduch by byl zcela nasycen, bude se tato psychrometrická diference rovnat nule. V souladu s dříve uvedeným vzrůstá za kritickým bodem teplota materiálu, která se s ubývajícím vlhkostí postupně blíží teplotě sušícího média. V obrázku 6. uvedené křivky platí pro textilní materiály sušené v horkovzdušném prostředí. Pokud sušící médium bude nahrazeno přehřátou parou, eventuálně pokud použijeme jiných sušících principů, jako je sálavé sušení, vysokofrekvenční ohřev ap., proběhnou tyto křivky zcela jinak.

2.4 Energetická bilance tepla v sušárně [10]

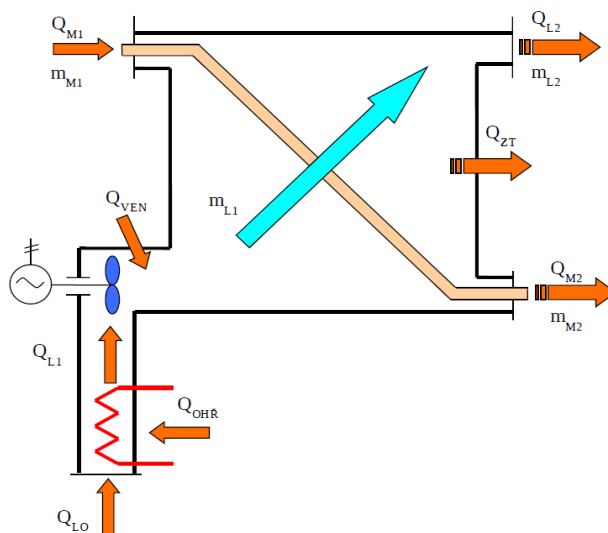
Energetická bilance je provedena za předpokladu, že voda obsažená ve vlhké látce není na tuto látku chemicky vázána a při sušení se odstraňuje vypařováním. Na povrchu materiálu vznikají vodní páry, jejichž parciální tlak p_{KM} může dosahovat tlak nasycených vodních par p_{KM}'' , odpovídající teplotě sytosti, která je tu shodná s teplotou sušené látky. Podstatou procesu sušení je difuze, mísení páry, která vznikla nad povrchem sušené látky s parami obsaženými v okolním vzduchu. Aby mohlo docházet k sušení je třeba, aby byla splněna podmínka uvedená v rovnici 13. Tedy aby parciální tlak nad povrchem materiálu p_{KM} byl větší než parciální tlak páry vlhkého vzduchu p_K použitého k sušení:

$$p_{KM} > p_K \quad (\text{rov } 17)$$

V opačném případě by docházelo ke kondenzaci par ze vzduchu na materiálu a tedy k jeho zvlhčování (viz. rovnice 15).

2.4.1 Energetické zhodnocení procesu sušení [10]

Na obrázku 7. je naznačeno základní schéma zařízení pro sušení hygroskopických látek atmosférickým vlhkým vzduchem.



Obrázek 7: Základní schéma sušárny [10]

Do zařízení přichází sušená látka s hmotností m_{M1} a odchází s hmotností nižší $m_{M2} < m_{M1}$. Rozdíl velikosti hmotnosti je dán hodnotou odpařeného množství vodních par ze sušené látky:

$$\Delta m_K = m_{M1} - m_{M2} \quad [\text{kg}] \quad (\text{rov } 18)$$

Teplu sušené látky na vstupu je označeno Q_{M1} a na výstupu Q_{M2} . Do sušárny vstupuje atmosférický vzduch s obsahem tepla Q_{L0} , které je dáno entalpií vzduchu, respektive jeho teplotou a relativní vlhkostí. K snížení relativní vlhkosti, parciálního tlaku vodních par přiváděného vzduchu a tedy za účelem zvýšení účinnosti procesu sušení, je vzduch ohřívám otopným tělesem, teplem $Q_{OHŘ}$ a dále ventilátorem dopravován do sušicího prostoru. V této části sušárny zůstává zachována hmotnost vzduchu a jeho poměrný vodní obsah. V sušicí komoře dochází k přímému styku sušicího vzduchu a sušené látky. Při tomto pochodu dochází k přenosu hmotnosti vodních par, vody ze sušené látky do sušicího vzduchu, v důsledku čehož se zvyšuje jeho poměrný obsah vodních par.

Při ustáleném stavu sušení, časově neproměnném hmotnostním toku vzduchu a sušené látky, základních fyzikálních veličin určujících jednotlivé stavy je možno napsat následující rovnici **tepelné a energetické bilance**:

$$Q_{L0} + Q_{OHŘ} + Q_{M1} + Q_{VEN} = Q_{L2} + Q_{M2} + Q_{ZT} \quad [J] \quad (\text{rov } 19)$$

$Q_{L0} = m_{sv} \cdot h_0$ – tepelná energie vzduchu na vstupu do sušárny [J]

$Q_{OHŘ}$ – teplo dodané topným tělesem sušárny [J]

Q_{M1} – tepelná energie sušené látky na vstupu do zařízení [J]

Q_{VEN} – energie odpovídající práci ventilátoru [J]

$Q_{L2} = m_{sv} \cdot h_2$ – tepelná energie vzduchu na výstupu ze sušárny [J]

Q_{M2} – tepelná energie sušené látky na výstupu ze sušárny [J]

Q_{ZT} – ztráty, vysálané a odvedené teplo během procesu do okolí [J]

Hmotnostní bilance sušení:

$$\Delta m_k = m_{M1} - m_{M2} = m_{L2} - m_{L1} = m_{sv} \cdot (x_2 - x_1) \quad [kg] \quad (\text{rov } 20)$$

Δm_k – hmotnost vody, která přechází ve formě par z vysoušené látky do upraveného vzduchu při sušení [kg]

m_{sv} – hmotnost suchého vzduchu [kg]

x_1, x_2 – poměrný obsah vodní páry ve vzduchu na vstupu a výstupu ze sušicí komory sušárny [$kg \cdot kg^{-1}$]

Z uvedené rovnice 20 stanovíme měrnou spotřebu suchého vzduchu M_{sv} potřebnou k odpaření jednotky hmotnosti vody následovně:

$$M_{sv} = \frac{m_{sv}}{\Delta m_k} = \frac{1}{x_2 - x_1} \quad [kg \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rov } 21)$$

Změna celkového tepelného obsahu vlhkého vzduchu v průběhu sušení lze pomocí rovnice 19 vyjádřit následovně:

$$Q_{L2} - Q_{L1} = Q_{MI} + Q_{VEN} - (Q_{M2} + Q_{ZT}) \quad [J] \quad (\text{rov } 22)$$

$Q_{L1} = Q_{L0} + Q_{OHŘ}$ – vyjadřuje teplo obsažené ve vzduchu po jeho ohřátí topným tělesem [J]

Po vydělení rovnice 22 hodnotou Δm_K dostáváme rovnici tepelné bilance ve tvaru:

$$q_{L2} - q_{L1} = q_{MI} + q_{VEN} - (q_{M2} + q_{ZT}) \quad [J \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rov } 23)$$

kde jednotlivé členy rovnice vyjadřují množství tepla vztahované k jednotce hmotnosti vysoušené vlhkosti. Levou stranu rovnice 23 můžeme vyjádřit pomocí entalpií následovně:

$$\begin{aligned} q_{L2} - q_{L1} &= \frac{1}{\Delta m_K} \cdot (m_{sv} \cdot (h_2 - h_1)) = \frac{m_{sv}}{\Delta m_K} \cdot (h_2 - h_1) = \\ &= M_{sv} \cdot (h_2 - h_1) = \frac{(h_2 - h_1)}{(x_2 - x_1)} \quad [J \cdot kg^{-1}] \end{aligned} \quad (\text{rov } 24)$$

Kde h_1 a h_2 jsou odpovídající entalpie vlhkého vzduchu na vstupu a výstupu ze sušicí komory sušárny.

Po dosazení rovnice 24 do rovnice 23:

$$M_{sv} \cdot (h_2 - h_1) = q_{MI} + q_{VEN} - (q_{M2} + q_{ZT}) = \Delta q' \quad [J \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rov } 25)$$

a následnou úpravou rovnice 25 dostáváme vztah pro entalpii vzduchu na výstupu ze sušárny:

$$h_2 = h_1 + \frac{\Delta q'}{M_{sv}} = h_1 + \Delta q' \cdot (x_2 - x_1) = h_1 + \Delta h' \quad [J \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rov } 26)$$

Kde $\Delta h'$ představuje změnu entalpie vlhkého vzduchu a vyjadřuje souhrn energetických změn sušené látky, energetický vliv přídavných zařízení (ventilátorů) a tepelné ztráty za provozu sušárny.

2.4.2 Sušení v Mollierově diagramu [10]

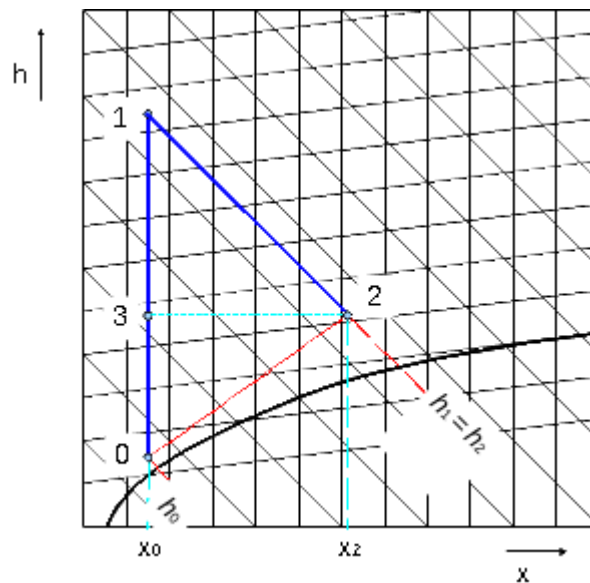
Proces sušení s výhodou snadného určení jednotlivých stavů vzduchu zakreslujeme do Mollierova diagramu vlhkého vzduchu. V případě sušení v teoretické sušárně znázorníme jeho průběh podle obrázku 8. Teoretická sušárna je taková, kdy poslední člen z rovnice 26 je roven nule, tedy:

$$\Delta h' = 0 \quad [J \cdot kg^{-1}] \quad (\text{rov } 27)$$

To znamená, že změna tepelné energie sušící látky je zanedbatelná a ventilační práce je přibližně stejně velká jako tepelné ztráty izolací sušárny.

Dále v textu jsou základní stavy vlhkého vzduchu v sušárně označeny následovně:

- Stav „0“ – stav vzduchu před ohříváčem
- Stav „1“ – stav po ohřátí vzduchu
- Stav „2“ – stav vzduchu na výstupu ze sušárny

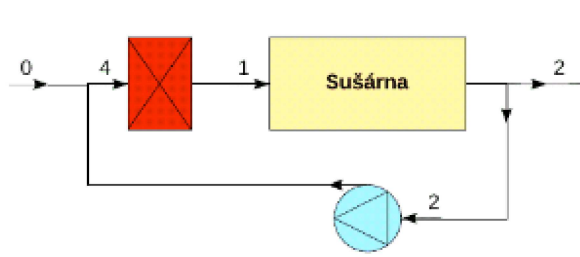


Obrázek 8: Průběh sušení v teoretické sušárně [10]

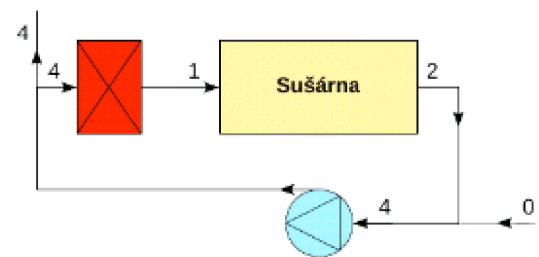
Ve skutečné sušárně je nutné uvažovat se změnou teploty vysušované látky, prací ventilátoru a tepelnými ztrátami izolačními deskami sušárny. Je dosti pravděpodobné, že entalpie $\Delta h' \neq 0$ a tudíž entalpie ve stavu „2“ bude buď větší, $h_2 > h_1$ – sušení s přívodem tepla, nebo bude menší, $h_2 < h_1$ – sušení s odvodem tepla.

2.4.3 Oběhy sušáren [9]

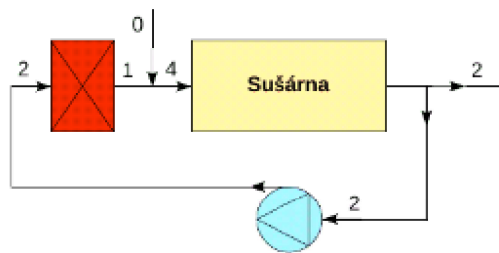
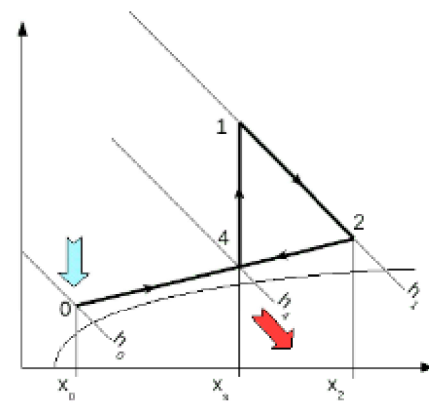
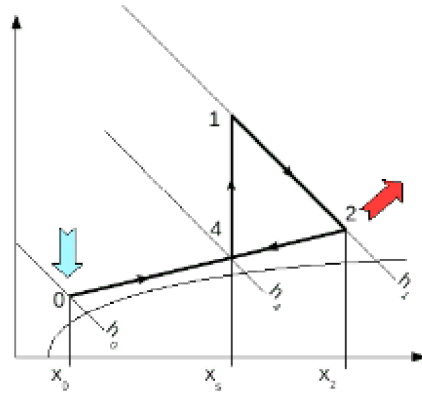
V technické praxi se setkáváme s různými úpravami vlhkého vzduchu, respektive oběhy sušícího vzduchu v sušárnách. Volba sušícího oběhu je závislá na konkrétních požadavcích dané sušárny. Na obrázku 9 jsou zobrazeny sušárny s oběhovým vzduchem, kterých se používá především z důvodu dodržení stálého režimu sušení nezávisle na klimatických poměrech. Poměr mísení je automaticky regulován tak, aby měrná vlhkost po mísení byla stálá.



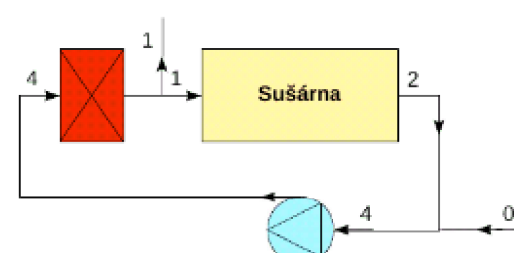
Obvod s recirkulací vzduchu varianta A:
Přívod vzduchu před ohřevačem, odvod vzduchu za sušárnou



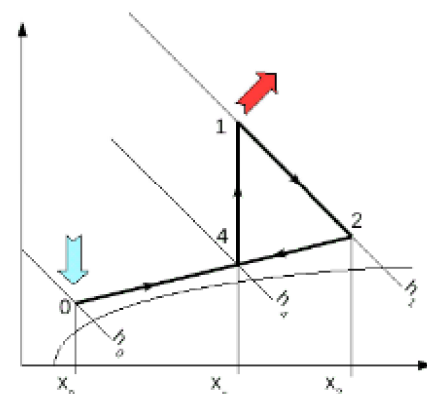
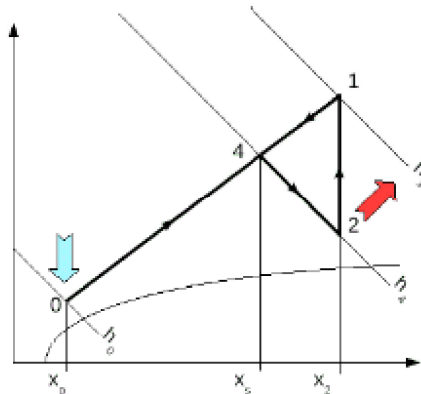
Obvod s recirkulací vzduchu varianta B:
Přívod vzduchu před ventilátorem, odvod vzduchu před ohřevačem



Obvod s recirkulací vzduchu varianta C:
Přívod vzduchu za ohřevačem, odvod vzduchu za sušárnou



Obvod s recirkulací vzduchu varianta D:
Přívod vzduchu před ventilátorem, odvod vzduchu za ohřevačem



Obrázek 9: Obvody s recirkulací vzduchu [9]

Dále se hojně používají sušárny vícestupňové, a to z důvodu omezení maximální teploty a v případě není-li možný dostatečný průtok vzduchu. Sušárna je řešena tak, že se procházející vzduch postupně dohřívá na přípustnou teplotu po jeho ochlazení (nasyčení).

Je rovněž možné využít nasycený odcházející vzduch ze sušárny k částečnému ohřevu přiváděného vzduchu. To samozřejmě přináší energetickou úsporu avšak za cenu zvýšených nákladů na konstrukci sušárny. V těchto sušárnách se používají výměníky deskové nebo regenerační. K energetické úspoře vede rovněž použití alternativního přehřevu například pomocí solárních kolektorů. Avšak vhodnost daných energetických opatření je vždy nutné řešit s ohledem na instalovaný výkon a produkci.

2.5 *Přenos tepla a hmoty v textilních materiálech [1]*

Obecně při sušení probíhají současně 2 základní pochody:

- **Sdílení tepla** – za účelem přeměny kapaliny v páru
- **Přenos hmoty** – tj. vodní páry z povrchu sušené látky mezní vrstvou do okolního sušicího prostředí.

2.5.1 **Odpařování a vypařování (var) [1]**

Proudí-li plyn podél hladiny kapaliny, vytvoří se mezní vrstva, obsahující směs páry a plynu za předpokladu, že při používaných teplotách plyn nekondenzuje a v kapalině je prakticky nerozpustný.

Bezprostředně u hladiny dosáhne pára meze sytosti, dané výší mezní teploty, která se na hladině vytvořila a je stejná pro plyn i kapalinu. V důsledku koncentračního spádu v mezní vrstvičce pak difunduje pára z hladiny kapaliny do plynu, při čemž stav sytosti na hladině se udržuje dodatečným odpařováním kapaliny.

Proces, který se tímto způsobem odehrává, se nazývá odpařování. Tlak páry kapaliny nad hladinou nebo nad mokrým povrchem libovolné látky je nižší, než tlak okolního plynu. Tím se odpařování od varu, při němž je parciální tlak nasycené páry nad kapalinou vyrovnán s tlakem okolí.

2.5.2 **Sdílení tepla a přenos hmoty při odpařování [1]**

Vyjádříme-li průběh sušení pomocí Mollierova $h-x$ digramu pro vlhký vzduch, jak je uvedeno v kapitole 2.4.2, je proces jasný po stránce termodynamické, nelze však určit jeho časový průběh. Dobu sušení lze určit stanovením rychlosti přenosu hmoty. Tato rychlost závisí jak na zmíněném koncentračním spádu, tak i na individuální konstantě, tj. součiniteli přestupu.

Odpařování je charakterizováno současným přestupem tepla i hmoty. Pokud jde o sušení konvekční, přenáší se teplo z proudícího sušicího média (nejčastěji vzduchu, nebo směsi vzduchu a kouřových plynů) na hladinu vypařující se kapaliny, nebo na vlhký povrch sušeného tělesa, při čemž současně určitá část vlhkosti přechází do plynu jako pára.

Tento přestup, označovaný jako difúze, je molekulárním pochodem právě tak, jako přestup tepla a jeho předpokladem je pohyb molekul. Přestup tepla můžeme totiž pokládat rovněž za difúzi teplejších molekul do chladnějších partií plynu nebo kapaliny,

takže dochází k úplné analogii mezi přestupem tepla a hmoty. Oba pochody podléhají stejným zákonům, jak dokazují diferenciální rovnice pro přestup tepla i pro difúzi ve všeobecném tvaru, vypracované Nusseltem a Schmidtem.

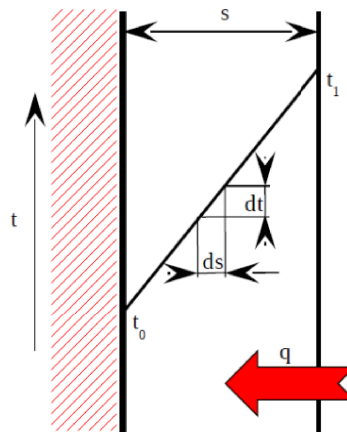
Při odpařování difunduje pára vzniklá na hladině kapaliny nebo na povrchu vlhkého tělesa mezní vrstvou a je potom dále odváděna prouděním a turbulentním mísením podobně jako při přestupu tepla. Při přestupu tepla je hnací silou pochodu teplotový spád, při přestupu hmoty koncentrační spád.

Vyjádříme-li pro názornost oba děje stejným způsobem, obdržíme následující vztahy:

Pro tepelný tok q – kolmo k mezní vrstvě, platí Fourierova rovnice:

$$q = -\lambda \cdot \frac{dt}{ds} \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (\text{rov } 28)$$

Záporné znaménko značí, že tepelný tok je ve směru klesající teploty.



Obrázek 10: Přenos tepla [1]

Mezi oběma ohraničujícími plochami mezní vrstvy o tloušťce s (obrázek 10) platí, vycházíme-li ze vztahu pro vedení tepla (rovnice 28), že:

$$q = \frac{\lambda}{s} \cdot (t_1 - t_0) \approx \alpha \cdot (t_1 - t_0) \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (\text{rov } 29)$$

t_0 – teplota povrchu vlhkého tělesa (hladiny kapaliny)[K]

t_1 – teplota proudícího plynu na okraji mezní vrstvy[K]

α – součinitel přestupu tepla [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]

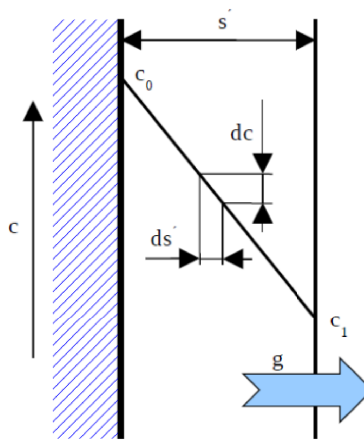
λ – tepelná vodivost tekutiny [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

Jde-li o přestup hmoty, je nutno rozlišovat mezi mezní vrstvou propustnou v obou směrech a vrstvou, propustnou jen v jednom směru.

U oboustranně propustné vrstvy jsou obě vrstvy ohraničující stěny, propustné pro obě difundující plynné látky (např. vodní páru i vzduch). Pro tento pochod platí Fickův vztah, vyznačený následujícím výrazem (rovnice 30), pro difúzní tok hmoty g (obrázek 11).

$$g = -D \cdot \frac{dc}{ds'} = \frac{D}{s'} \cdot (c_0 - c_1) \approx \beta \cdot (c_0 - c_1) \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (\text{rov } 30)$$

- D – difúzní konstanta [$\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$]
 c_0 – koncentrace na povrchu tělesa [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
 c_1 – koncentrace na okraji mezní vrstvy [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
 β – součinitel přestupu hmoty [$\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$]
 s' – tloušťka vrstvy [m]



Obrázek 11: Přenos hmoty [1]

Tento vztah může být použit jen v tom případě, nenastanou-li v poli difúze žádné větší změny teploty. Není-li tomu tak, je nutno do úvah zavést namísto koncentrace parciální tlaky dle následujícího vztahu:

$$c = \frac{p_p}{R_p \cdot T} \quad (\text{rov } 31)$$

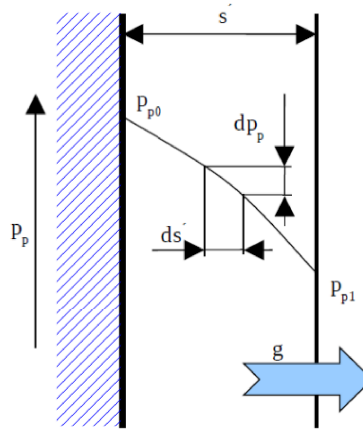
- R_p – plynová konstanta vodní páry [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

Difúzní tok hmoty g lze pak vyjádřit následovně (rovnice 31 dosazena do rovnice 30):

$$g = \frac{\beta}{R_p \cdot T} \cdot (p_{p0} - p_{p1}) \quad (\text{rov } 32)$$

- p_{p0} – parciální tlak vodní páry na povrchu sušené látky [Pa]
 p_{p1} – parciální tlak vodní páry na okraji mezní vrstvy [Pa]

Jde-li o difúzi vodní páry do okolního vzduchu, jedná se o jednostranně propustnou vrstvu, jíž může projít jen jedna z obou zúčastněných látek, totiž vodní pára. Tento děj je vyznačen na obrázku 12.



Obrázek 12: Přenos hmoty (větší změny teploty) [1]

Vlhký povrch je jednostranně propustnou stěnou, kterou pára, vzniklá v důsledku přívodu tepla, difunduje do okolního plynu. Protože vzduch, který by měl snahu difundovat v opačném směru, nemůže do povrchu proniknout, proud vzduchu je znemožněn proudem páry v opačném smyslu. Pro tento jev platí Stefanův difúzní zákon:

$$g = -\frac{D}{R_p \cdot T} \cdot \frac{p}{p - p_{pstř}} \cdot \frac{dp_p}{ds'} = \frac{D}{s'} \cdot \frac{1}{R_p \cdot T} \cdot \frac{p}{p - p_{pstř}} \cdot (p_{p0} - p_{p1}) \quad (\text{rov } 33)$$

$p_{pstř}$ – je střední parciální tlak vodní páry [Pa]

$$p_{pstř} = \frac{p_p'' + p_p}{2} \quad (\text{rov } 34)$$

p_p'' – je tlak vodní páry odpovídající varu při dané teplotě [Pa]

p_p – je parciální tlak vodní páry ve směsi vzduch – pára [Pa]

Protože součinitel přestupu hmoty pro jednostranně propustnou stěnu je:

$$\beta_I = \frac{D}{s'} \cdot \frac{p}{p - p_{pstř}} \quad (\text{rov } 35)$$

Po dosazení dostáváme:

$$g = \frac{\beta_I}{R_p \cdot T} \cdot (p_{p0} - p_{p1}) \quad (\text{rov } 36)$$

Výraz:

$$p - p_{pstř} = \frac{p_{p0} - p_{p1}}{\ln \frac{p - p_{p1}}{p - p_{p0}}} \quad (\text{rov } 37)$$

je středním parciálním tlakem proudu.

U malých středních parciálních tlaků páry ($p_{pstř} \rightarrow 0$) je $\beta_l \approx \beta$. Na místo Stefanovy rovnice může být s dostatečnou přesností použita rovnice Fickova.

Pro speciální problémy přestupu tepla a hmoty při vynuceném proudění platí následující vztahy:

- Přestup tepla

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} = C \cdot Re^m \cdot Pr^n \quad (\text{rov } 38)$$

- Přestup hmoty oboustranně prostupnou mezní vrstvou

$$Sh = \frac{\beta \cdot L}{D} = C \cdot Re^m \cdot Sc^n \quad (\text{rov } 39)$$

- Přestup hmoty jednostranně prostupnou mezní vrstvou

$$Sh = \frac{\beta_l \cdot L}{D} = C \cdot Re^m \cdot Sc^n \cdot \frac{p}{p - p_{pstř}} \quad (\text{rov } 40)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad \text{– je Schmidtovo číslo}$$

Exponent n je dle druhu proudění $0 < n < 1$. Jeho mezní hodnoty jsou:

- Pro čistě laminární proudění $n = 0$
- Pro přestup tepla a hmoty na rovných stěnách s laminární mezní vrstvou a turbulentním prouděním v oblasti plynu (typicky v sušárnách) $n \approx 1/3$
- Pro náběhové pásmo proudění bez tření $n \approx 1/2$
- Pro čistě turbulentní proudění $n = 1$

Vzájemný poměr přestupu tepla a přenosu hmoty dostaneme vydělením odpovídajících rovnic.

- **Oboustranně prostupná mezní vrstva:**

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{Pr}{Sc}\right)^n = \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{D}{a}\right)^n = c_p \cdot \rho \cdot \left(\frac{a}{D}\right)^{1-n} = c_p \cdot \rho \cdot Le^{1-n} \quad (\text{rov } 41)$$

$$Le = \frac{a}{D} = \frac{Sc}{Pr} \quad \text{Lewisovo číslo} \quad (\text{rov } 42)$$

$$Le^{1-n} = \frac{\alpha}{\beta \cdot \rho \cdot c_p} \quad \text{Lewisův koeficient} \quad (\text{rov } 43)$$

• **Jednostranně prostupná mezní vrstva:**

$$\frac{\alpha}{\beta_I} = \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Sc}}\right)^n \cdot \left(1 - \frac{p_{\text{pstř}}}{p}\right) = \frac{\lambda}{D} \cdot \left(\frac{D}{a}\right)^n \cdot \left(1 - \frac{p_{\text{pstř}}}{p}\right) = c_p \cdot \rho \cdot \left(\frac{a}{D}\right)^{1-n} \cdot \left(1 - \frac{p_{\text{pstř}}}{p}\right) \quad (\text{rov } 44)$$

V následující tabulce 1 jsou uvedeny poměry α/β pro jednotlivé případy exponentu n . Vztah platný pro čistě turbulentní proud předpokládá, že tloušťka mezní vrstvy je nekonečně malá. Namísto hodnoty parciálního tlaku $p_{\text{pstř}}$ může být dosazen tlak u stěny p_{p0} .

Druh proudění	Exponent n	$\frac{\alpha}{\beta}$	$\frac{\alpha}{\beta_I}$
Čistě laminární	0	$c_p \cdot \rho \cdot Le$	$c_p \cdot \rho \cdot Le \cdot \left(1 - \frac{p_{\text{pstř}}}{p}\right)$
Turbulentní s laminární mezní vrstvou	$\frac{1}{3}$	$c_p \cdot \rho \cdot Le^{\frac{2}{3}}$	$c_p \cdot \rho \cdot Le^{\frac{2}{3}} \cdot \left(1 - \frac{p_{\text{pstř}}}{p}\right)$
Náběhové pásmo bez tření	$\frac{1}{2}$	$c_p \cdot \rho \cdot Le^{\frac{1}{2}}$	$c_p \cdot \rho \cdot Le^{\frac{1}{2}} \cdot \left(1 - \frac{p_{\text{pstř}}}{p}\right)$
Čistě turbulentní	1	$c_p \cdot \rho$	$c_p \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{p_{\text{pstř}}}{p}\right)$

Tabulka 1: Poměr součinitelů α/β pro různé druhy proudění [1]

Rovnice pro obousměrně prostupnou mezní vrstvu a turbulentní proud se nazývá Lewisův zákon:

$$\frac{\alpha}{\beta} = c_p \cdot \rho \quad (\text{rov } 45)$$

Pro směs „vzduch – vodní pára“ byla sestavena následující tabulka 2 při tlaku 0,98 kPa a pro různé teploty. V tabulce uvedený součin $c_p \cdot \rho$ je součtem příslušných hodnot pro suchý vzduch (index v) a pro vodní páru (index p):

$$c_p \cdot \rho = c_{p_v} \cdot \rho_v + c_{p_p} \cdot \rho_p = \frac{p - p_p}{R_v T} c_{p_v} + \frac{p_p}{R_p T} c_{p_p} \quad (\text{rov } 46)$$

Součinitel tepelné vodivosti λ byl vypočten jako součet vodivosti vzduchu λ_v a páry λ_p podle směšovacího pravidla. Rozdíl mezi tlaky páry na vlhké ploše a v proudě vzduchu byl jako bezvýznamný zanedbán.

Teplota	Tlak p_p	λ	D	$c_p \cdot \rho$	λ / D	a / D
20 °C	238 Pa	0,022	0,093	0,288	0,237	0,82
50 °C	1258 Pa	0,0229	0,112	0,267	0,205	0,767
80 °C	4829 Pa	0,0233	0,132	0,257	0,169	0,658

Tabulka 2: Hodnoty λ , D , $c_p \cdot \rho$, λ / D a a / D pro různé teploty a tlak 0,98 kPa [1]

Bezrozměrné Lewisovo číslo $Le = \frac{a}{D}$ představuje poměr mezi rychlostmi výměny tepla a hmoty, který je závislý na druhu proudění.

Aby bylo možné sledovat difúzní procesy i v $h-x$ diagramu vlhkého vzduchu, musíme přepsat rovnici 32

$$g = \frac{\beta}{R_p \cdot T} \cdot (p_{p0} - p_{p1})$$

tak, že rozdíl parciálních tlaků nahradíme rozdílem koncentrací. Absolutní množství vodní páry ve vlhkém vzduchu x vyjádříme pomocí parciálního tlaku páry p_p a celkového tlaku p následovně:

$$x = \frac{R_v}{R_p} \cdot \frac{p_p}{p - p_p} \quad (\text{rov } 47)$$

Kde R_v a R_p jsou univerzální konstanty pro vzduch a vodní páru.

Zavedením čísla výparu δ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$]¹ dostává rovnice 32 pro difúzní tok hmoty následující tvar:

$$g = \sigma \cdot (x_0 - x_1) = \sigma \cdot \frac{R_v}{R_p} \cdot \left(\frac{p_{p0}}{p - p_{p0}} - \frac{p_{p1}}{p - p_{p1}} \right) \quad (\text{rov } 48)$$

V případě, že parciální tlaky páry p_{p0} a p_{p1} jsou zanedbatelné vůči celkovému tlaku, můžeme výše uvedenou rovnici zjednodušit následovně:

$$g = \sigma \cdot \frac{R_v}{R_p \cdot p} \cdot (p_{p0} - p_{p1}) \quad (\text{rov } 49)$$

Porovnáním rovnic 32 a 49 musí také platit:

$$\sigma = \beta \cdot \frac{p}{R_v \cdot T} \approx \beta \cdot \rho \quad (\text{rov } 50)$$

Lewisův zákon (rovnici 46) můžeme tedy psát ve tvaru:

1 V soustavě jednotek SI přísluší číslu výparu jednotka [$\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$], ale v technické praxi je rozšířeno použití jednotky 3,6 x větší [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$].

$$\frac{\alpha}{\beta \cdot \rho} = c_p = \frac{\alpha}{\sigma} \quad (\text{rov } 51)$$

2.5.3 Odpařování volné vody s přímkovým průběhem – úsek konstantní rychlosti sušení [1]

Při sušení plošných textilií nás bude nejvíce zajímat úsek konstantní rychlosti sušení, kdy dochází k odpařování volné vody (kap. 2.3.1). V tomto úseku je sušení určováno výhradně přenosem hmoty. Zvyšování rychlosti sušení v tomto úseku můžeme docílit zvýšením rozdílu parciálních tlaků, vyšší teplotou a zvýšením rychlosti vzduchu a snížením relativní vlhkosti vzduchu, ale pouze s ohledem na dosažení výsledné kvality materiálu.

Protože se v této fázi sušení jedná o fyzikálně jednoznačný pochod vypařování, je množství odpařené kapaliny za jednotku času při konstantních parametrech vzduchu následující (rovnice 32):

$$g = \frac{\beta}{R_p \cdot T} \cdot (p_{p0} - p_{p1})$$

Toto množství je odvislé při daných podmínkách pouze od součinitele přenosu hmoty β a od povrchové teploty zboží. Pro případ dvojice *voda-vzduch* se tato teplota rovná teplotě vlhkého teploměru. V praxi může být tato teplota o něco vyšší z důvodu předávání tepla nikoliv pouze prouděním, ale navíc i sáláním a vedením.

Na základě podobnosti přestupu tepla a hmoty je možné vypočítat příslušné přestupní součinitele.

Pro laminární proudění podél zboží tvaru desky: (*pro* $Re < 10^5$)

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} = 0,332 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33} \quad (\text{rov } 52)$$

L – vzdálenost od počátku desky ve směru proudu vzduchu [m]

α – místní součinitel přestupu ve vzdálenosti L [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]

Pro praktické výpočty je užitečnější střední hodnota součinitele mezi začátkem a vzdáleností L .

$$Nu_{str} = \frac{\alpha_{str} \cdot L}{\lambda} = 0,664 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33} \quad (\text{rov } 53)$$

Pro turbulentní proudění: (*pro* $Re > 5 \cdot 10^5$, a *vzduch* $Pr = 0,71$)

$$Nu_{stř} = \frac{\alpha_{stř} \cdot L}{\lambda} = 0,057 \cdot Re^{0,78} \cdot Pr^{0,78} \quad (rov\ 54)$$

Látkové konstanty se dosazují pro střední teplotu:

$$t_{stř} = \frac{1}{2} \cdot \left[\vartheta_0 + \frac{t_1 + t_2}{2} \right] \quad (rov\ 55)$$

ϑ_0 – teplota povrchu desky [K]

t_1 a t_2 – teploty vzduchu na počátku a konci měřené dráhy [K]

Známe-li specifické hmotové průtočné množství sušicího plynu, které je definováno jako součin $c \cdot \gamma$ [$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$], je možné upravit kriteriální rovnici pro turbulentní proudění následovně:

$$\alpha_{stř} = 0,057 \cdot \left(\frac{\lambda}{L} \right)^{0,22} \cdot (c \cdot \gamma \cdot c_p \cdot 3600)^{0,78} \quad (rov\ 56)$$

c – lineární rychlost sušicího plynu [$m \cdot s^{-1}$]

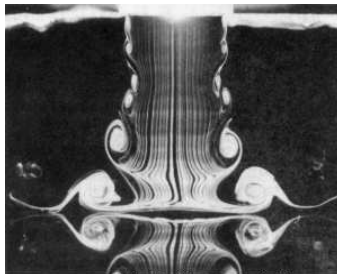
γ – specifická hmota [$kg \cdot m^{-3}$]

Tato rovnice platí pro hladké plochy, jsou-li však plochy, podél nichž proudí vzduch, poněkud zdrsňené, můžeme uvažovat přestup asi o 5 % vyšší, tedy hodnota koeficientu 0,057 je nahrazena hodnotou 0,06.

Z Lewisova vztahu pak můžeme stanovit pomocí součinitele přestupu tepla α i součinitel přestupu hmoty β , eventuálně hodnotu výparu σ . Z měření vyšlo najevo, že součinitel přestupu tepla α , a tím rovněž i součinitel přenosu hmoty β stoupá s rychlostí vzduchu přibližně v relaci ($c^{0,8}$) [1].

2.6 Současný stav tryskových impaktních systému a trendy vývoje

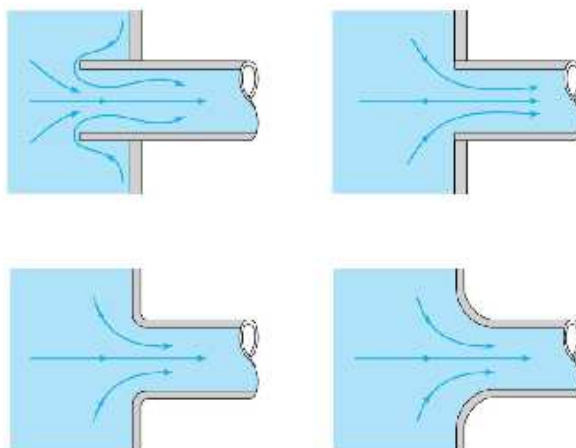
2.6.1 Volba proudění impaktních sušáren [11]



Obrázek 13: Obraz impaktního proudění [11]

Přenos hmoty (tepla) obecně závisí na typu proudění. Při turbulentním proudění je přenos hmoty několikanásobně intenzivnější než při proudění laminárním (obrázek 13).

Výtok z trysky a jeho obraz proudění je značně závislý na tvaru trysky (obrázek 14). Tlakové ztráty způsobené kontrakcí proudu mohou být ovlivněny vhodnou konstrukcí výtokové trysky. Vhodným konstrukčním zásahem lze dosáhnout výhodnějšího profilu jádra proudu.



Obrázek 14: Výtok z trysky – kontrakce proudu [11]

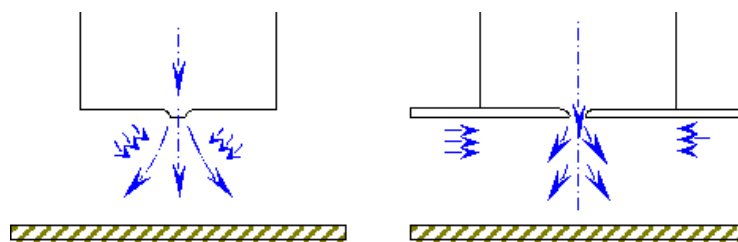
Nejvýhodnější proud by měl být takový, který bude mít nejdelší jádro proudu. V jádře proudu je rychlost konstantní a je rovna rychlosti výtokové. Z hlediska délky jádra proudu bude vhodné sušený materiál umístit do vzdálenosti od ústí trysky takové, aby na materiál dopadalo ještě jádro proudu. Je zde však omezení konstrukční (výška řetězu vedoucího materiál).

2.6.2 Průzkum v oblasti impaktních tryskových systémů [5]

Z publikovaných poznatků jednoznačně vyplývá, že především kvalita impaktních proudů má zásadní vliv na součinitele přenosu hmoty a tepla. Vhodné zásahy do kvality impaktních proudů vedoucí ke zvýšení transportních součinitelů můžeme rozdělit do čtyř skupin:

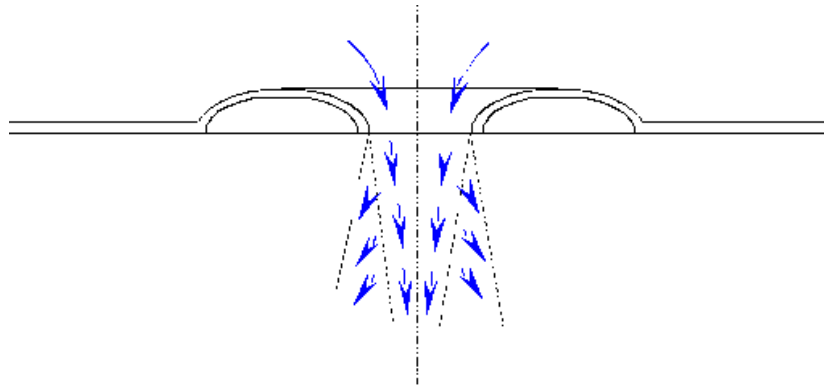
1. Nejméně účinné jsou zásahy ovlivňující turbulenci proudů přímo v ústí trysky tj. měnící hodnotu vnitřní – primární turbulence proudu (turbulizátory, mřížky v ústí trysky).
2. Účinnější jsou zásahy vytvářející změny výtokových rychlostních profilů, tj. ovlivňují oblast směšování proudů s vnějším okolím a vytvářející vnější turbulenci na okraji proudů („laminární“ kruhové, čtvercové, trojúhelníkové proudy).

Výhodnějším řešením umístění trysek v tryskové komoře je jejich přesazení vzhledem k spodní stěně komory (obrázek 15). Při výtoku proudu vzduchu z výstupního průřezu trysky dochází k okamžitému mísení s okolním vzduchem a jeho přísávání do proudu. Jestliže je v rovině průřezu ústí trysky stěna, probíhá toto směšování nevýhodně, protože okolní vzduch strháváný do proudu vzduchu vycházejícího z trysky proudí kolem stěny a je touto stěnou brzděn. Z toho vyplývá, že charakter impaktního proudu je z hlediska transportních součinitelů nevýhodný. Výsledkem je snížení součinitelů přestupu tepla na sušeném materiálu. Proto je vhodné při použití štěrbinových trysek vytvořit přesazení vzhledem ke stěně komory.



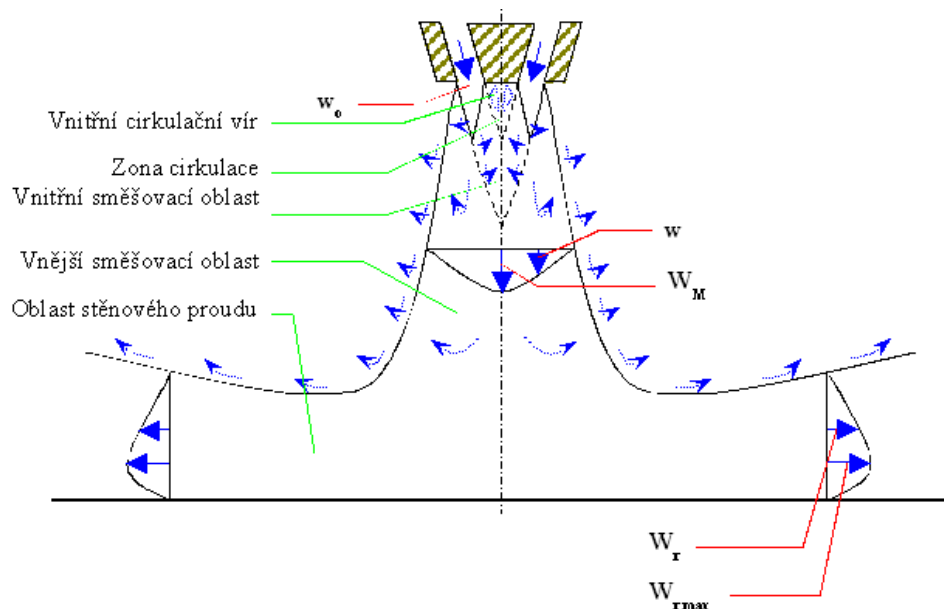
Obrázek 15: Umístění štěrbinových trysek ve stěně [5]

U kruhových trysek se z výrobních důvodů tento problém řeší tvarovaným prolisem (obrázek 16) ve stěně tryskové komory. Na vnitřní straně tryskové komory tento tvarovaný prolis zlepšuje navádění vzduchu do ústí trysky a zlepšuje součinitel odporu ξ .



Obrázek 16: Kruhová tryska s prolisem [5]

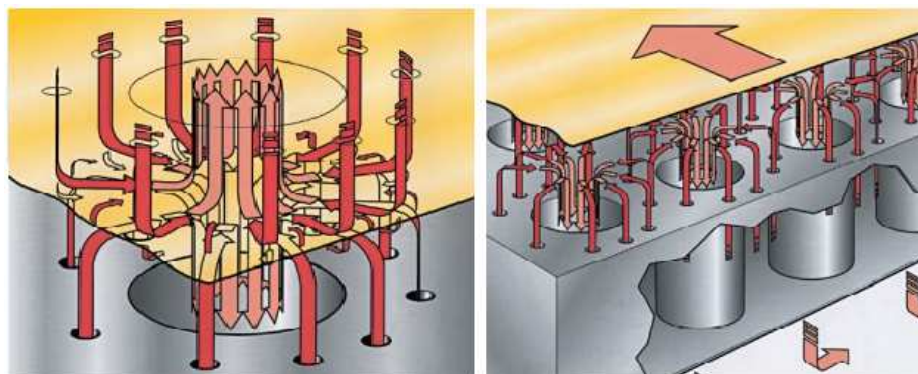
3. Velmi účinné jsou proudy, které vytvářejí složitá pole turbulence a rychlosti (obrázek 17), tj. ovlivňují jak vnitřní oblast směšování proudů, tak i směšování proudů s vnějším okolím (např. anulární proudy).
4. Největšího zvýšení transportních součinitelů se dosahuje zásahy do aerodynamických poměrů přímo nad stěnou nebo na stěně, především v náběžné oblasti (děrované přepážky, síta, dráty pro generování vírů). Dalším možným způsobem, jak ovlivnit transportní součinitele na ofukované stěně, je použití pulsujících proudů.



Obrázek 17: Tryska s vnější a vnitřní směšovací oblastí [5]

Dále je řešena problematika odvodu již nasyceného vzduchu z komory sušáren. Celá problematika je sledována z hlediska ovlivnění jednotlivých impaktních proudů. Řada systémů je řešena dělenými tryskovými komorami, mezi kterými jsou souvislé kanály pro odvod vzduchu. Další způsob odvodu používaný u kruhových trysek je na-

příklad systém „STAR JET“ (obrázek18), kde jsou kruhové trysky hvězdicově uspořádány kolem odváděcího otvoru.



Obrázek 18: Odvod vzduchu – Systém Star Jet [12]

Z provedeného průzkumu v oblasti impaktních tryskových systémů a z podkladů různých výrobců impaktních sušáren byla vytipována čtyři typová konstrukční uspořádání tryskové komory. Tyto komory jsou koncipovány tak, aby bylo vytvořeno rovnoměrné tlakové pole nad sušenou textilií, a dále pak s ohledem na účinnost sušení, aby se jednotlivé proudy z okolních trysek neovlivňovaly. Rovnoměrnosti se dosahuje především vhodným uspořádáním trysek v komoře. Vyšší účinnosti pro dané rozmístění trysek a dané podmínky sušení se dosahuje vhodným odváděním již vlhkostí nasyceného vzduchu z komory.

3 Praktická část

Pro návrh tryskové komory impaktní sušárny je nejprve proveden průzkum stávajících tryskových systémů, analýza těchto systémů a vyhodnocení důležitých aerodynamických vlastností tryskových systémů ovlivňující výsledný sušicí výkon. Následně pak je proveden návrh konstrukčního řešení zkušební impaktní sušárny, na které jsou prováděna experimentální ověření výsledných konstrukčních řešení nové tryskové komory. Dalším úkolem této práce pak je vlastní konstrukce zkušební impaktní sušárny s recirkulačním vzduchotechnickým okruhem. Pro objektivní ověření výsledné konstrukce nové tryskové komory jsou navrženy a vyrobeny porovnávací tryskové komory využívající stávající systémy. Stěžejní částí této etapy práce pak jsou provedená experimentální porovnání jednotlivých tryskových systémů a to jak z hlediska sušicího výkonu, tak i z hlediska rovnoměrnosti sušení. Dále je prověřována možnost zvýšení transportních součinitelů využitím oscilujících impaktních proudů v tryskových systémech používaných při sušení plošných textilních materiálů. Následně pak je nová trysková komora použita v impaktní části mikrovlnné sušárny. Provedené práce jsou prováděny v rámci Výzkumného centra Textil II, kde jsem byl členem řešitelského týmu.

3.1 Konstrukční návrh porovnávacích tryskových systémů

Pro ověření nejvýhodnějšího uspořádání trysek impaktních proudů a geometrického uspořádání odváděcích trysek, byly jednotlivé typické tryskové systémy, které vycházejí z konstrukcí tryskových komor světových výrobců konstrukčně zpracovány. Tyto stávající tryskové systémy, jejichž geometrie byla získána jednak z prospektů jednotlivých výrobců a hlavně z informací získaných na veletrhu ITMA, byly následně porovnány z hlediska výkonu a rovnoměrnosti sušení s nově navrhovanou tryskovou komorou, která vychází ze systému Advafix. Systém Advafix je poslední tryskový systém vyvíjený pro NSF (napínací, sušicí a fixační) rám fy. Elitex v roce 1998 ve VÚTS a.s. Liberec. Pro tato uspořádání byla provedena FEM analýza pomocí programu Fluent. Výsledky získané numerickou simulací pak byly verifikovány měřeními na zkušebním zařízení konstruovaného tak, aby se zde mohly všechny vytypované tryskové systémy proměřit. Plocha tryskových komor byla navržena s ohledem na průkaznost výsledků a možné porovnání různých konstrukcí. Jako hlavní sledovaná část byla vybrána

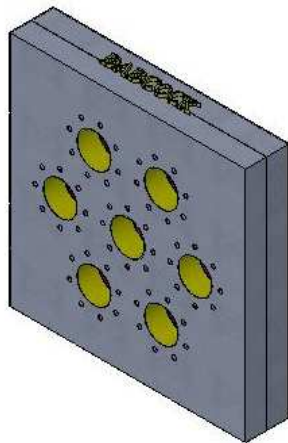
centrální oblast trysek v komoře s možností sledování této oblasti s ovlivňováním sousedními (krajními) oblastmi.

3.1.1 Porovnávací tryskové systémy

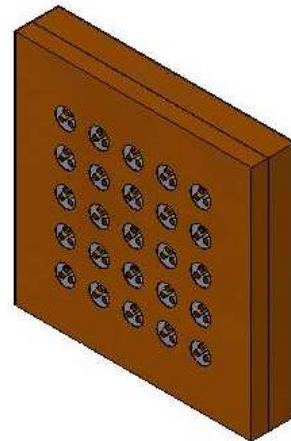
Společným rysem porovnávacích komor je důraz na přenosové vlastnosti těchto tryskových systémů. Z hlediska ekonomického je nutné již při návrhu nové tryskové komory zvážit nejenom termodynamické vlastnosti tryskového systému, ale s velkým důrazem je nutné řešit technologickou náročnost systému. Dále je nutné z provozních důvodů řešit otázky týkající se provozního čištění tryskového systému a jeho přístupnosti obsluze. Tyto aspekty však nejsou v této práci zohledňovány, což přináší určitou volnost z hlediska návrhu tryskového systému, kdy je možné se soustředit pouze na technické aspekty týkající se přenosových jevů a rovnoměrnosti sušení.

3.1.1.1 Komora 1

Tryskový systém této komory vychází z tryskového systému STAR JET (obrázek 18) a je odvozen od tryskového systému BABCOCK. Jedná se o užití osmi kruhových trysek soustředěných kolem centrálního odsávacího otvoru, který má za úkol minimalizovat délku dráhy příčného proudění jednotlivých proudů, které vzniká po dopadu impaktních proudů na sušený materiál.



Obrázek 19: Komora 1 – systém centrálního odvodu vzduchu



Obrázek 20: Komora 2 – systém vnitřní a vnější cirkulace

Z tohoto systému (obrázek 19) byly stanoveny následně rozměry ostatních porovnávacích tryskových komor. Aby bylo možné sledovat centrální oblast ovlivněnou nejbližšími sousedními tryskami, byla tato komora vybavena šesticí sousedních odsávacích otvorů, kde je každý odsávací otvor, stejně jako centrální skupina, vybaven osmicí kruhových trysek. Přívod tlakového ohřátého vzduchu je řešen z boku komory. Odváděný nasycený vzduch je veden do prostoru sušárny kolmo od sušeného materiálu, odkud

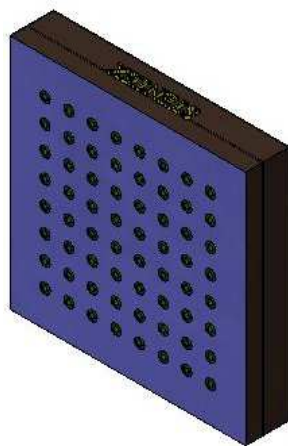
pak je následně nasáván ventilátorem. Podobným způsobem je provedena recirkulace vzduchu u všech porovnávacích komor.

3.1.1.2 Komora 2

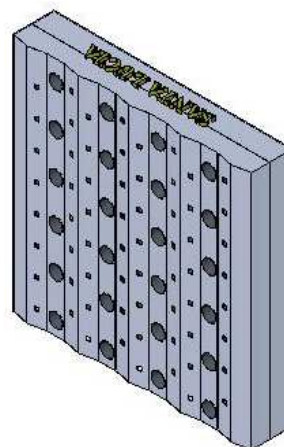
Tryskový systém této komory vychází z tryskového systému využívající systém vnitřní a vnější cirkulace vzduchu. Tento systém je odvozen z tryskového systému BRÜCKNER. Systém využívá trojice přívodních trysek v jedné skupině. Tyto trysky jsou vzájemně natočeny pod daným úhlem. Kolem této přívodní trojice trysek je pak odsávací otvor pro odvod nasyceného vzduchu z oblasti sušení. Celá komora je pak ještě uvnitř rozdělena na horní část, která slouží k přívodu sušicího (nenasyceného, ohřátého) vzduchu k jednotlivým sušicím tryskám z boku a na dolní část, která slouží ke sběru nasyceného vzduchu a jeho odvodu rovněž z boku do prostoru sušárny do oblasti sání ventilátoru. Tento systém využívá vnitřní cirkulační vír, který je vytvořen trojicí proudů vystupujících z trojice trysek. Po spojení těchto proudů následně dochází ke směšování s vnějším vzduchem a to v oblasti blíže k sušenému materiálu. Aby bylo možné provést interakci jednotlivých proudů, je nutné vést tryskový vzduch nikoliv kruhovými, ale válcovými tryskami.

3.1.1.3 Komora 3

Tryskový systém této komory (obrázek 21), který ideově vychází ze systému STENTEX, zajišťuje kolmé navedení proudů na sušený materiál. K tomuto účelu je použito válcových místo kruhových trysek.



Obrázek 21: Komora 3 – systém zajišťující kolmý proud



Obrázek 22: Komora 4 – čtvercové trysky s odvodem

Tyto trysky jsou soustředně umístěny do odsávacích otvorů. Podobně jako u systému komory 2 je využito k bočnímu přívodu nenasyčeného vzduchu od ventilátoru s ohřivačem horní části komory a pro boční odvod nasyceného vzduchu z odváděcích

otvorů spodní části komory. Válcová tryska má za důsledek přivedení vyvinutého proudu z tryskové komory, který není výrazněji ovlivněn aerodynamickými poměry na výstupu z komory, jako tomu může být v případě kruhových trysek. Toto navedení proudu válcovou tryskou, zajišťující stabilitu proudu a kolmost dopadajícího proudu na sušený materiál, je na úkor hydraulických ztrát způsobených právě délkou válcové trysky. Hydraulické ztráty a kontrakce proudu je zde řešena větším průměrem této trysky oproti standardním kruhovým tryskám.

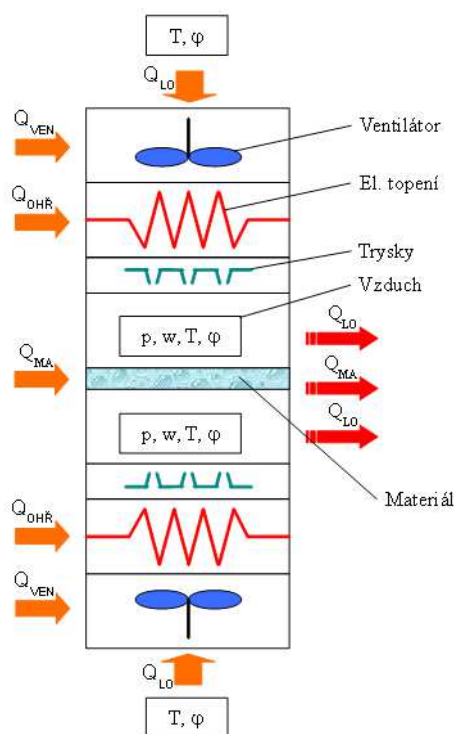
3.1.1.4 Komora 4

Tryskový systém této komory, který je odvozen od tryskového systému SANTA LUCIA, je tvořen podobně jako systém komory 1 centrálními odsávacími otvory nasyceného vzduchu, ale na rozdíl od něj nejsou přívodní trysky centrovány okolo tohoto otvoru. Tento systém z důvodu zvýšení turbulence proudění využívá netypických čtvercových trysek. Tyto trysky jsou navíc uspořádány v řadě tak, aby se jednotlivé trysky v různých řadách ovlivňovaly a vytvářely tak složité turbulentní oblasti. Toho je docíleno tím, že jednotlivé řady trysek nejsou kolmé na sušený materiál, ale svírají s ním určitý úhel. V tomto systému není upravena čtvercová tryska na výstupu z komory naváděcím plechem (plech ohnutý směrem do vnitřku komory), který slouží k narovnání proudu do kolmého směru na sušený materiál. Centrální odsávací otvor je orientován kolmo na sušený materiál a jeho geometrie umožňuje výstup nasyceného vzduchu nad komoru do oblasti sušárny podobně jako odsávací systém komory 1. Proto vnitřní část komory není dělená a slouží pouze k bočnímu přívodu sušícího vzduchu.

3.2 Zkušební testovací sušárna

3.2.1 Ideový návrh zkušební testovací sušárny

Pro porovnání stávajících systémů tryskových komor, ověření numerických simulací těchto komor a pro zkoušky nové tryskové komory impaktní sušárny je nutné zajistit odpovídající zkušební zařízení. Toto zařízení, experimentální impaktní sušárna, schématicky znázorněné na obrázku 23, předpokládá ofukování textilie z obou stran. Elektrický ohřev vzduchu zajistí teplotu $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Transport ohřátého vzduchu je realizováno radiálním ventilátorem, který je řízen frekvenčním měničem. Pomocí tohoto frekvenčního měniče je možné regulovat výtakovou rychlost z trysek až do $50\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Sušárna je vybavena bezřetězovým, jednoduchým systémem vkládání textilie.



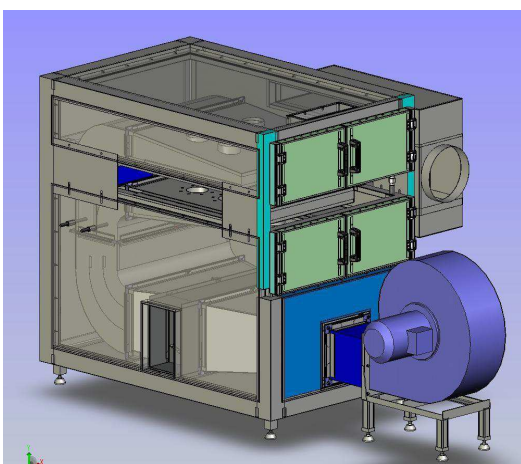
Obrázek 23: Schéma experimentální impaktní sušárny

Sušárna je koncipována tak, aby umožnila změnu vzdálenosti horní a spodní komory v rozsahu 80 mm až 120 mm a to pomocí čepů se závity na obou stranách, kdy na jedné straně je použito závitu s pravým stoupáním a na druhé straně závitu s levým stoupáním. Sušený materiál je umístěn ve středu mezi komorami, tedy ve vzdálenosti 40 mm až 60 mm od horní i spodní komory. Důležitým konstrukčním uzlem experimentální impaktní sušárny je pak možnost jednoduché výměny tryskových komor s různými tryskovými systémy. Sušárna je koncipována jako recirkulační. Vzhledem k účelu této sušárny, která má sloužit pro porovnání jednotlivých tryskových systémů mezi se-

bou, není řešena otázka přísávání falešného vzduchu a detailnější řešení izolací ani rekuperace tepla.

3.2.2 Konstrukce zkušební impaktní sušárny

Na následujícím obrázku 24 je znázorněno konstrukční uspořádání zkušebního zařízení impaktní sušárny, které je dále použito k měření rovnoměrnosti výtokové rychlosti porovnávacích tryskových komor se současnými typickými tryskovými systémy a k měření sušících křivek a tím rychlosti sušení jednotlivých tryskových komor. Dále pak je na této sušárně prováděno měření rovnoměrnosti sušení jednotlivých tryskových komor termovizní metodou.



Obrázek 24: Experimentální impaktní sušárna – CAD model



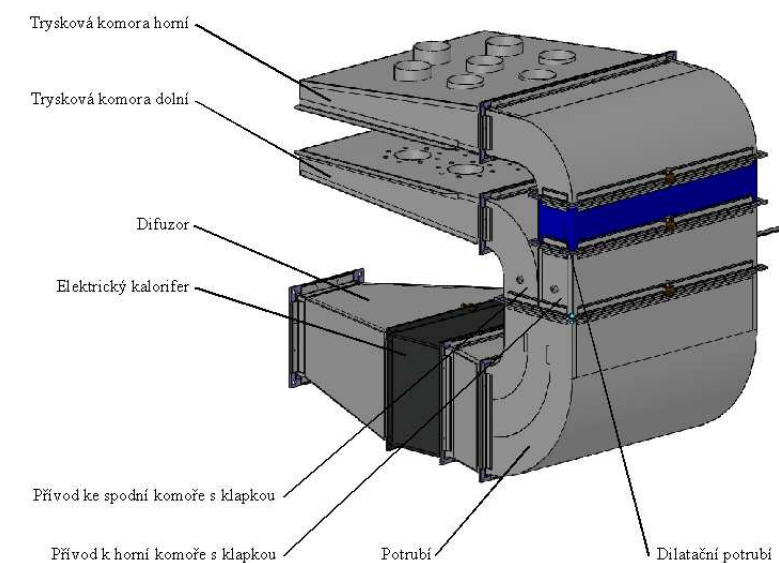
Obrázek 25: Experimentální impaktní sušárna – skutečnost

Konstrukce sušárny je tvořena rámem s izolačními deskami pro omezení tepelných ztrát do okolí. Základní rám je vybaven v rozích čtyřmi šrouby, které slouží k nastavení odpovídající vzdálenosti mezi komorami. Vzduchotechnický okruh je tvořen radiálním ventilátorem, který je umístěn mimo sušárnu, podobně jako recirkulační jednotka. Tato jednotka sbírá nasycený vzduch ze sušárny a dále pomocí klapky umožňuje přísávání čerstvého vzduchu z okolí. Izolovaná dvířka umožňují výměnu jednotlivých tryskových komor. Vnitřní část vzduchotechnického okruhu (obrázek 26) slouží k dopravě vzduchu od ventilátoru difuzorem k elektrickému topení (kaloriferu) a dále pak k rozvodu připraveného sušícího vzduchu do horní a spodní tryskové komory. Pro nastavení srovnatelných podmínek ve spodní a horní tryskové komoře je přiváděcí potrubí k jednotlivým komorám vybaveno klapkami. Pomocí těchto klapek je možné nastavit shodné výtokové rychlosti v obou komorách.

Dilatační potrubí je vyrobeno z neprovzdušné textilie a slouží k vyrovnání délky potrubí při různém nastavení vzdálenosti mezi komorami. Celý vzduchotechnický

okruh včetně komor je spojen pomocí vzduchotechnických spojek zajišťujících těsnost jednotlivých napojovaných součástí okruhu.

Plocha testovacích komor je $700 \times 600 \text{ mm}$, rám určený ke vkládání textilních vzorků určených k sušení má rozměry $700 \times 760 \text{ mm}$. Pomocí potenciometru ovládajícího frekvenční měnič je možné nastavit výtokové rychlosti v rozmezí od $22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ až $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (obrázek 29). Sušárna je rovněž vybavena teploměrem (PT100) a teplotním regulátorem, který umožňuje nastavit teplotu vzduchu v rozmezí od $30 \text{ }^\circ\text{C}$ do $80 \text{ }^\circ\text{C}$, krátkodobě až $90 \text{ }^\circ\text{C}$. Instalovaný tepelný výkon sušárny je 30 kW a průtok vzduchu ventilátorem maximálně $1600 \text{ m}^3 \text{ hod}^{-1}$.



Obrázek 26: Vzduchotechnický okruh experimentální sušárny

Koncepce sušárny je taková, že při testování komor je zaručen „měřicí komfort“ spočívající v relativně dobrém přístupu k testovaným komorám.

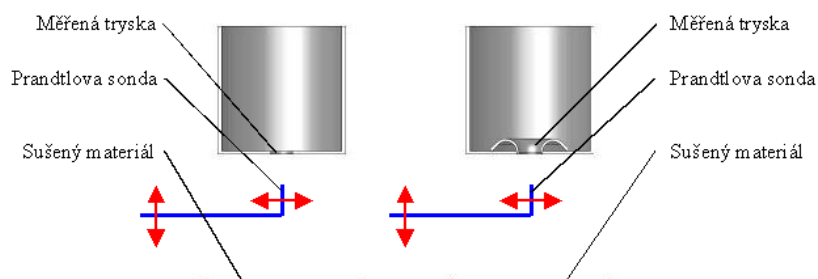


Obrázek 27: Rám pro vkládání a vyndávání měřených vzorků ze sušárny

To umožňuje jednoduché měření výtokových rychlostí a teplot impaktních proudů, snadné vyjímání zkoušených textilních materiálů a jejich vkládání. Z těchto dů-

vodu je konstrukce řešena jako otevřená, a to za cenu zvýšených tepelných ztrát, které budou pro všechna měření stejné.

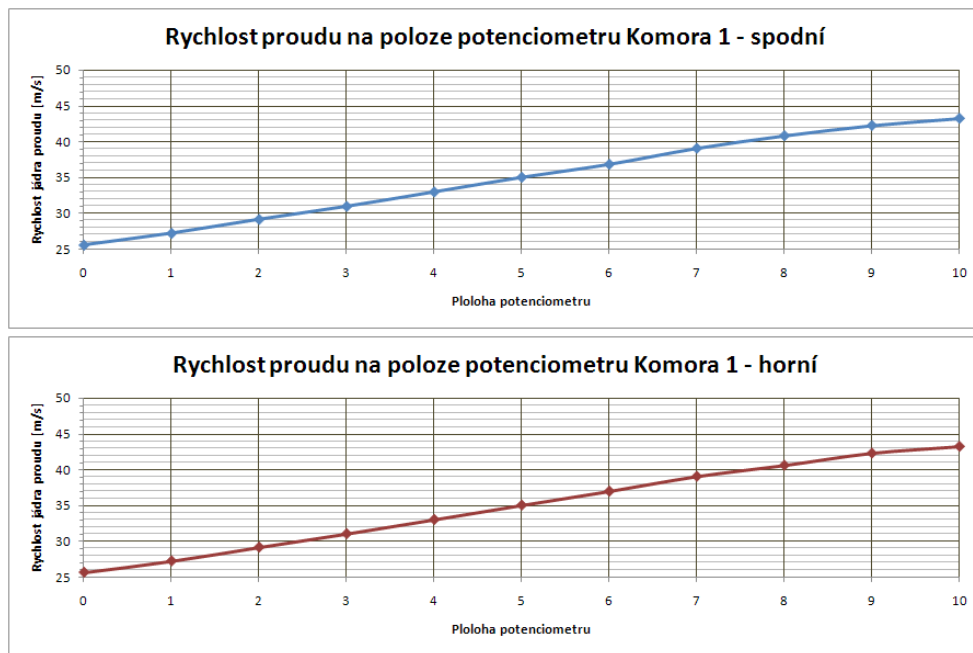
Pro experimentální stanovení rychlosti sušení, která bude hlavním porovnávacím kritériem tryskových systémů, bylo nutné vyřešit rychlé vkládání sušených vzorků do sušárny. Uchycení sušených vzorků na jehličky, tak jak je to běžné v průmyslových sušárnách, se neosvědčilo, a to zvláště z důvodu velké časové náročnosti vkládání a vyjímání měřených vzorků (cca 15 až 20 s). Tento čas se projevoval v následném zpracování naměřených dat a způsoboval podstatnou chybu určování měrné odpařivosti. Jako náhrada byl zvolen systém dvou rámu s vytvořeným sítem pomocí silonového vlasce (obrázek 27). Oba rámy byly spojeny otočným závěsem. Měřený vzorek se pak jednoduchým způsobem vkládal mezi jednotlivé rámy, respektive síta. Vhodnou hustotou jednotlivých ok síta byla zajištěna relativně dostačující fixace polohy měřeného vzorku v sušárně, respektive v rámu. Čas vyjmutí vzorků se zkrátil na cca 4 s.



Obrázek 28: Schéma měření Prandtlou sondou

Pro možnost rychlého nastavení výtokové rychlosti z trysek pro danou tryskovou komoru bylo provedeno měření výtokové rychlosti z trysky, která odpovídá danému nastavení potenciometru. Měření bylo prováděno podle schématu na obrázku 28, kdy se pro danou polohu potenciometru určovala pomocí Prandtlovy trubice výtoková rychlost pro střední trysku v komoře.

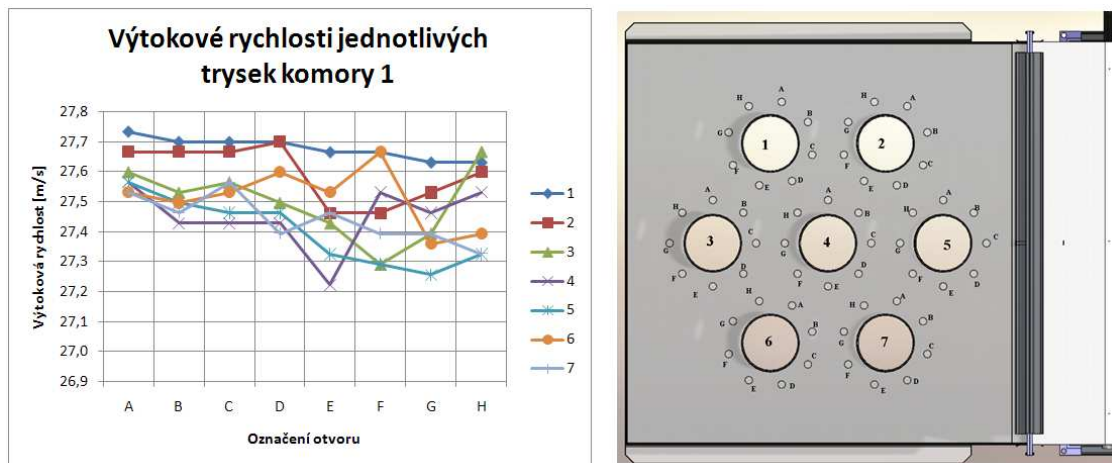
Z těchto hodnot pak byla sestrojena cejchovní křivka (obrázek 29) pro každou komoru testovanou v sušárně. V rámci cejchovní křivky potenciometru, udávající výtokovou rychlost v závislosti na poloze potenciometru (obrázek 29), byla proměřována i rovnoměrnost výtokových rychlostí z jednotlivých trysek tryskové komory. Například pro horní tryskovou komoru 1 byla naměřena následující data, zobrazená v grafu na obrázku 30. Poloha potenciometru byla nastavena na polohu 1, čemuž odpovídá průměrná výtoková rychlost $27,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (obrázek 29).



Obrázek 29: Rychlost proudu v závislosti na poloze potenciometru

Součinitel kontrakce byl zvolen 0,95. Předpokládaná výtoková rychlost pro dané nastavení potenciometru, ovládací otáčky ventilátoru, je dána střední hodnotou z těchto naměřených dat:

$$w = \bar{w} \mp 3 \cdot \sigma = 27,5 \mp 0,4 \left[m \cdot s^{-1} \right] \quad (\text{rov } 57)$$



Obrázek 30: Vyhodnocení výtokové rychlosti komory 1

Z grafu je patrné mírné snížení výtokové rychlosti u těch trysek (E, F, G, H), které jsou zastíněny odváděcími otvory (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7) uvnitř komory z hlediska proudění vzduchu od ventilátoru. Nicméně rozptyl naměřených hodnot, který se pohybuje v rozmezí $\pm 1,5 \%$ v celé testované komoře 1 je z hlediska rovnoměrnosti hodnot výtokových rychlostí více než přijatelný.

3.2.3 Metodika porovnání tryskových komor

Porovnání jednotlivých tryskových komor bylo provedeno pomocí měření sušícího výkonu klasickou metodou, tj. vážením vzorků před a po sušení a dále pak vyhodnocením jednotlivých komor pomocí termovize. Důvody pro použití termokamery byly následující:

- Jednoduchost experimentů
- Časová nenáročnost měření
- Sofistikované vyhodnocení dat
- Porovnatelnost výsledku s daty FEM
- Zkušenosti z minulých měření ([13])

Měření daných komor bylo realizováno za pomoci TU Liberec, jejichž pracoviště na katedře energetických zařízení je vybaveno špičkovou termokamerou Fluke Ti55 (obrázek 31).



Obrázek 31: Termokamera Ti55 IR FlexCam s technologií IR-Fusion [14]

Vlastní testování tryskových komor pomocí termovize probíhalo tak, že sušárna byla nejprve vytopena na 80°C a byly nastaveny jmenovité otáčky ventilátoru takové, aby výtoková rychlost z trysek byla $49\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Pro testování byly vybrány dva vzorky textilie, oba stejného materiálového složení avšak různé plošné hmotnosti.

- **Vzorek 1** – Vlna-PES 45/55, $173\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$
- **Vzorek 2** – Vlna-PES 45/55, $275\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$

Tyto vzorky byly před samotným sušením namočený do vody a odmáčkнутy pomocí foulardu, vloženy do mikroténového sáčku a následně zváženy. Po vyjmutí vzorku ze sáčku byl tento sáček zvážen. Vzorek textilie byl nasazen a napnut na jehličky umístěné na posuvném rámu (původní systém vkládání vzorků), kterým se po sejmutí chladného vzorku termokamerou umístil měřený vzorek do sušárny. Byly stanoveny dva

časy expozice v sušárně, a to 40 s a 120 s. Po uplynutí času byl rám vyjmut ze sušárny a okamžitě snímán termokamerou. Poté byly vzorky opět vloženy do sáčku a následně zváženy. Jednotlivé bitmapy těchto experimentů jsou uvedeny v příloze 1 – *Porovnání tryskových systémů komor K1, K2, K3 a K4*.

Měrná odpařivost² byla stanovena z rovnice 58:

$$a_s = \frac{m_1 - m_2}{S \cdot \tau} \cdot 3,6 \left[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hod}^{-1} \right] \quad (\text{rov } 58)$$

m_1 – je hmotnost vzorku před vložením do sušárny [Kg]

m_2 – je hmotnost vzorku po vyjmutí ze sušárny [Kg]

S – je plocha vzorku [m^2]

τ – je doba expozice vzorku v sušárně [s]

Vypočtené výsledky měrné odpařivosti jednotlivých komor jsou uvedeny na obrázcích 37 až 40. Plocha proměřovaných vzorků byla:

$$S = 0,70 \cdot 0,76 = 0,532 \left[\text{m}^2 \right] \quad (\text{rov } 59)$$

Na odmačkávacím zařízení se podařilo docílit počáteční vlhkost materiálu pro jednotlivé vzorky takto:

Vzorek 1 $u_1 = 130 \%$

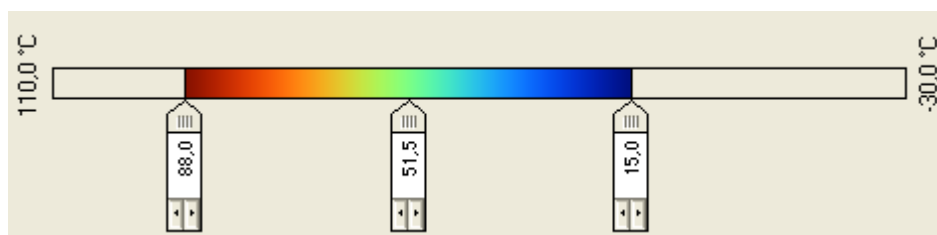
Vzorek 2 $u_1 = 125 \%$

3.2.4 Vyhodnocení měření

Výsledky měření jsou uvedeny na obrázcích 33 až 36. Jednotlivé komory byly nejprve analyzovány pomocí FEM metod [15]. K porovnání byl použit součinitel přestupu tepla na dopadové ploše určený pomocí řešiče Fluent (na obrázcích vlevo nahoře). Součinitel přestupu tepla byl použit proto, protože k porovnání nebylo možné použít teplotní pole na dopadové ploše, a to z důvodu okrajových podmínek výpočtu, teplota vycházela konstantní a odpovídala teplotě mokrého teploměru (viz. Kapitola 2.3.1). Výsledky termokamerových zkoušek jsou prezentovány plošným zobrazením teplot (na obrázcích vlevo dole) s barevným měřítkem shodným pro všechny testované komory podle obrázku 32. V plošném zobrazení teplot byly stanoveny dvě čáry (*svislá 0, vodorovná 1*), podél nichž byl vykreslen graf teplot (na obrázcích vpravo dole – označeno Čára). Na obrázku označeném 3D-IR (na obrázcích vpravo nahoře) je zobrazeno prostorové rozložení teploty, jenž kombinuje vlastně dvě předchozí zobrazení dohroma-

2 Měrná odpařivost nezohledňuje změnu rychlosti sušení při překročení kritického bodu K podle obrázku 6 v kapitole 2.3.1. Porovnání jednotlivých komor pomocí měrné odpařivosti lze použít pouze v úseku konstantní rychlosti sušení.

dy. Při porovnání těchto dvou veličin získaných jednak měřeními a také numerickou simulací se porovnávaly především odpovídající gradienty, které se měly shodovat.

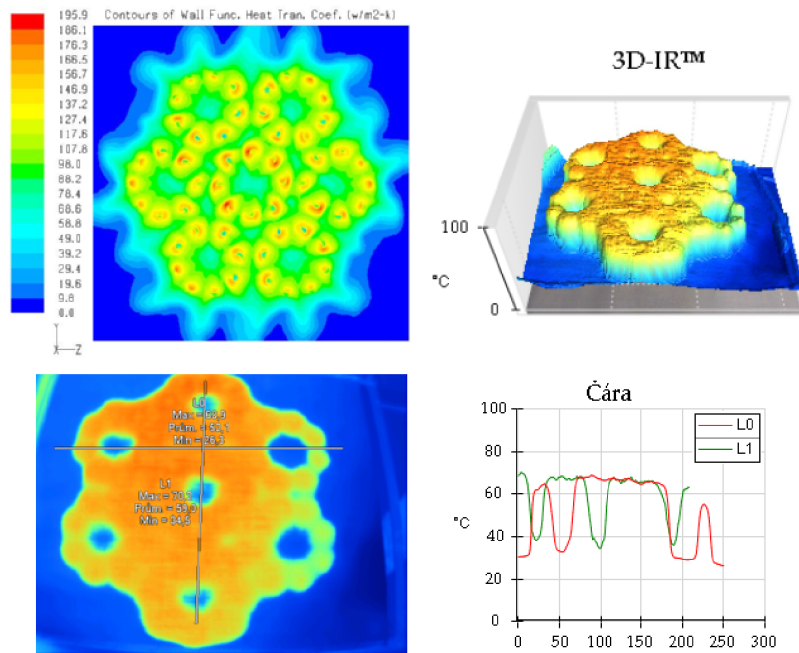


Obrázek 32: Orientační teplotní stupnice výstupu termokamery

Z obrázků 33 až 36 je patrné, že výsledky jsou porovnatelné a numerické výsledky jsou relativně spolehlivé pro prvotní návrhy tryskových systémů. Nicméně je stále nutné provádět experimentální ověření numerických výsledků. Ukázalo se, že souběžné možnosti v oblasti měření pomocí infračerveného teploměru jsou na takové úrovni, že je možné pomocí těchto metod porovnávat rovnoměrnost sušení jednotlivých systémů velice efektivně. Pro měření sušících výkonů je nutné použít klasických metod, například použitou hmotnostní metodu určující měrnou odpařivost. Přesnost použité metody stanovení měrné odpařivosti nenahrazuje stanovení rychlosti sušení z sušících křivek. Při tomto postupu stanovení měrné odpařivosti nelze stanovit přesnou hodnotu měrné odpařivosti, protože touto metodou nelze odlišit základní oblasti sušící křivky.

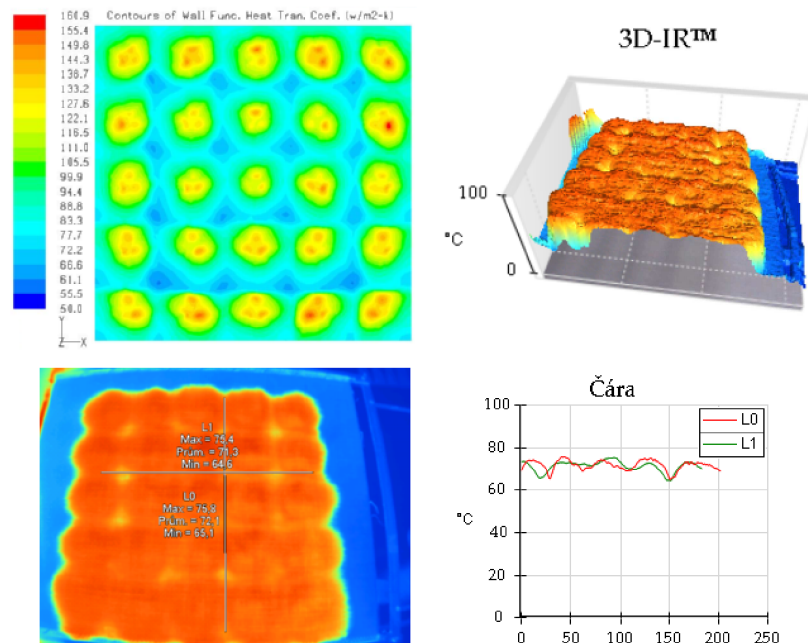
Z jednotlivých měření, především pro kratší čas expozice materiálu v sušárně, je patrné, že materiál s vyšší plošnou hmotností se prohřívá pomaleji než lehčí materiál. Můžeme zde pozorovat vliv první oblasti sušení, kdy oblasti pod tryskou, s největší hodnotou součinitele přestupu tepla, jsou již prohřátý na teplotu mokrého teploměru a dochází zde již k adiabatickému odpařování (oblast konstantní rychlosti sušení), kdežto v oblastech mimo dopad impaktních proudů se materiál ještě nahřívá na teplotu mokrého teploměru. U všech komor jsou jasně patrné stopy impaktních proudů, které odpovídají numerickým simulacím.

Na obrázku 33, jsou uvedeny výsledky komory 1. Jsou zde vidět relativně souměrné účinky od impaktních proudů okolo středové odsávací trysky. Tato skupina trysek je jakoby chráněna od okolí ostatní šesticí skupin trysek. V krajních oblastech, kde již nedochází k působení okolních trysek, je zřetelné snížení přestupu tepla vlivem odchýlení impaktního proudu od kolmého směru. Po prohřátí textilního materiálu a ohřátí vody se teplotní pole začíná slévat a vyrovnávat. Jsou zde patrné výrazně teplejší a výrazně chladnější oblasti.



Obrázek 33: Komora 1 – porovnání teplotního pole s FEM výsledky

Na obrázku 34, jsou uvedeny výsledky komory 2. Jedná se o soustavu trojic trysek, které jsou rovnoměrně rozloženy do obdélníkové plochy.

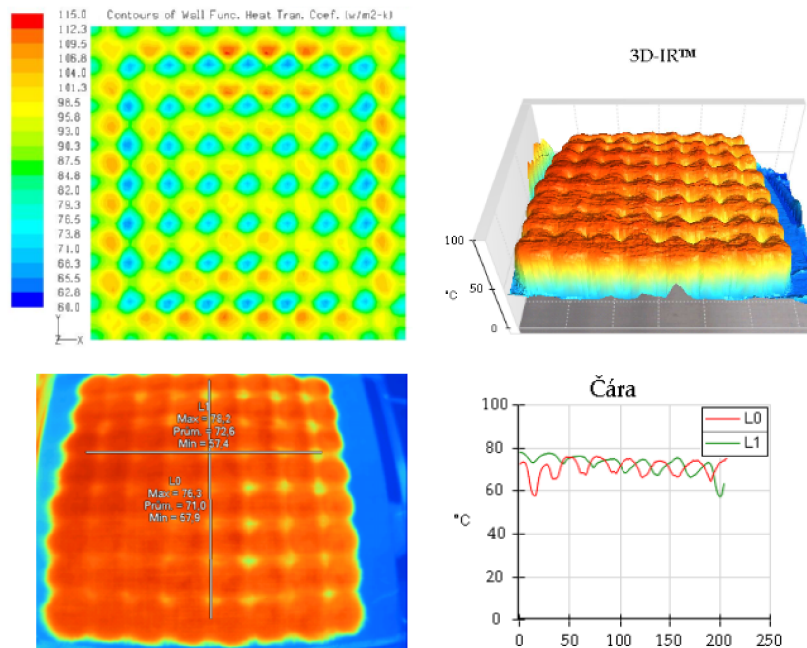


Obrázek 34: Komora 2 – porovnání teplotního pole s FEM výsledky

Z podmínky experimentu, kdy průtočné množství $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ teplého vzduchu je u všech testovaných komor stejné, tedy při rozdílných výstupních rychlostech vzduchu z trysek, lze konstatovat, že komora 2 vykazuje lepší rovnoměrnost ohřevu než komora 1. To je dáno především roz umístěním trysek do obdélníka u komory 2 oproti hexagonálnímu roz umístění trysek komory 1.

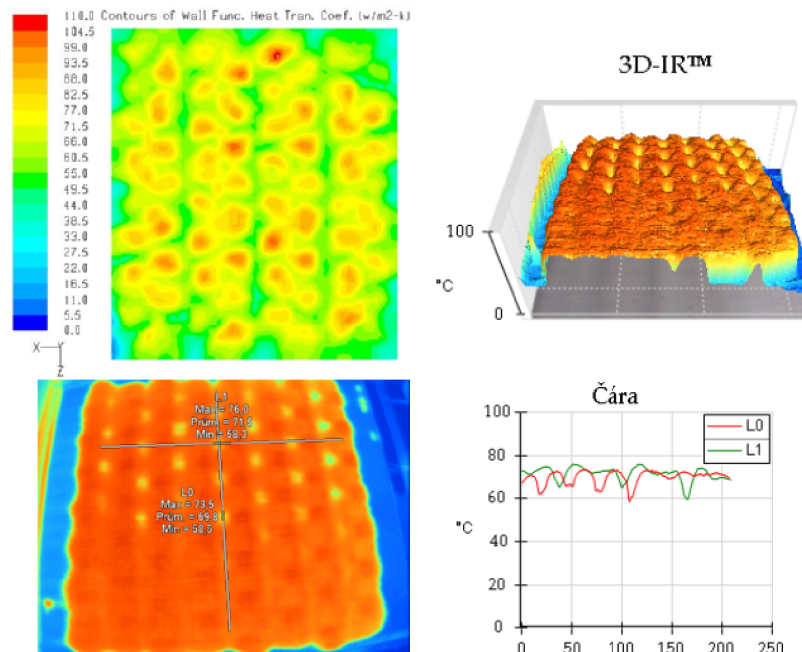
Na obrázku 35, jsou výsledky komory 3. Komora 3 je složena z válcových trysek většího průměru a umístěna ve středu odsávací trysky. Rozložení trysek je rovněž do

obdélníka jako v případě komory 2. Rovnoměrnost této komory je z důvodu takto umístěných trysek rovněž dobrá obdobně jako v případě komory 2.



Obrázek 35: Komora 3 – porovnání teplotního pole s FEM výsledky

Na obrázku 36, jsou výsledky komory 4. Tento systém využívá soustavu čtvercových trysek odkloněných od kolmice tak, že se vždy tři proudy vzájemně prolínají v oblasti dopadové plochy (textilie).

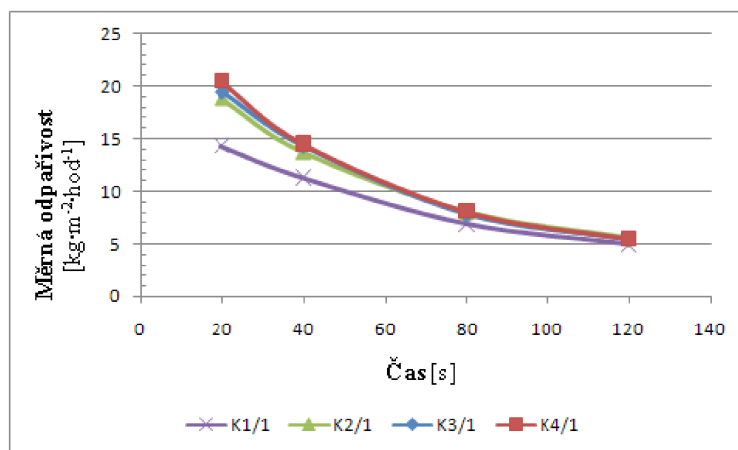


Obrázek 36: Komora 4 – porovnání teplotního pole s FEM výsledky

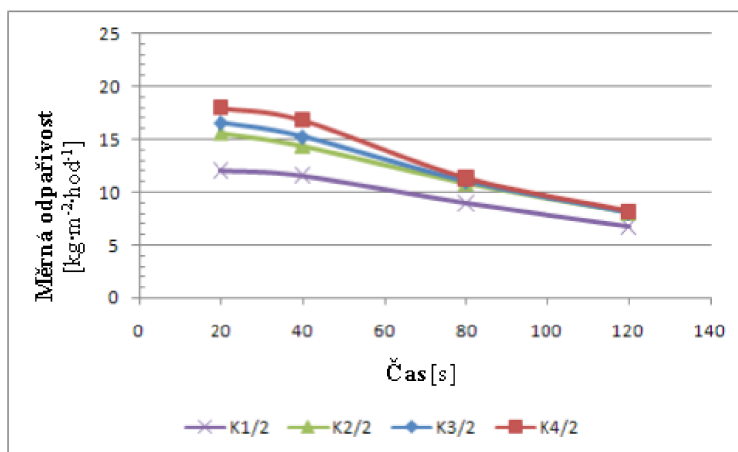
Tato trojice je soustředěna okolo jedné odsávací trysky. Z provedených měření je patrné, že co se týká rovnoměrnosti, je tento systém velice dobrým a to i z hlediska měrné odpařivosti. Problematická je však výroba, která je z vybraných systémů nejsložitější.

Z hlediska rovnoměrnosti sušení tak i z hlediska transportních součinitelů jsou systémy komory 2, 3 a 4 srovnatelné. Rovnoměrnost sušení komory 1 byla ovlivněna především uspořádáním a malou referenční plochou. V případě velkoplošných tryskových komor, kdy se okrajové trysky nebudou tolik podílet na rovnoměrnosti sušení, se dá předpokládat, že teplota bude rozložena jako je ve středu na obrázku 33 a to v celém rozsahu mimo okrajů.

Na obrázku 37, je uvedeno porovnání měrné odpařivosti jednotlivých tryskových komor provedených na vzorku 1. Na obrázku 38 jsou uvedeny výsledky měření měrné odpařivosti provedené na vzorku 2.



Obrázek 37: Měrná odpařivost komor K1, K2, K3 a K4; vzorek 1



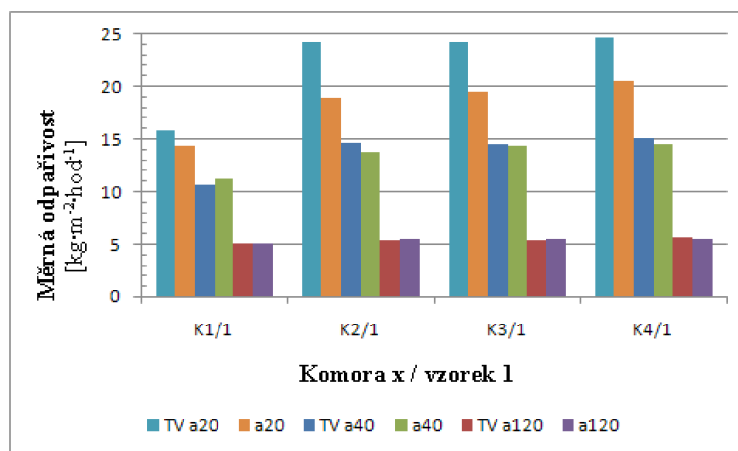
Obrázek 38: Měrná odpařivost komor K1, K2, K3 a K4; vzorek 2

Z porovnání obou grafů je zřejmé, že pro lehčí materiály jsou měrné odpařivosti vyšší než pro těžší, což je dáno ztíženým prohříváním materiálu směrem dovnitř. Z jednotlivých grafů je potom možné usuzovat, že z hlediska měrné odpařivosti je nejvýhodnější komora 4, dále pak komora 2 a následně komora 3. Tyto tři komory vykazují více či méně podobné hodnoty měrné odpařivosti, které se pohybují u vzorku 1 okolo

25 kg.m⁻².hod⁻¹ odpařené vody a u vzorku 2 okolo 17 kg.m⁻².hod⁻¹ odpařené vody pro všechny uvedené komory. U komory 1 byly naměřeny nejnižší hodnoty měrné odpařivosti.

Nutno však podotknout, že zkoušky byly prováděny na textilních vzorcích, které byly v klidu vůči tryskovým komorám. V případě pohybu textilie oproti tryskovým systémům se dosahuje vhodným posunutím základní geometrie trysek v jednotlivých komorách rovnoměrnějšího ohřevu po celé délce textilie. Nicméně z podmínky měření, kdy byla u všech měření ofukována stejná plocha textilního vzorku stejným množstvím vzduchu ohřátého na stejnou teplotu, je hodnota měrné odpařivosti u komory 1 přibližně 3/4 oproti ostatním testovaným komorám.

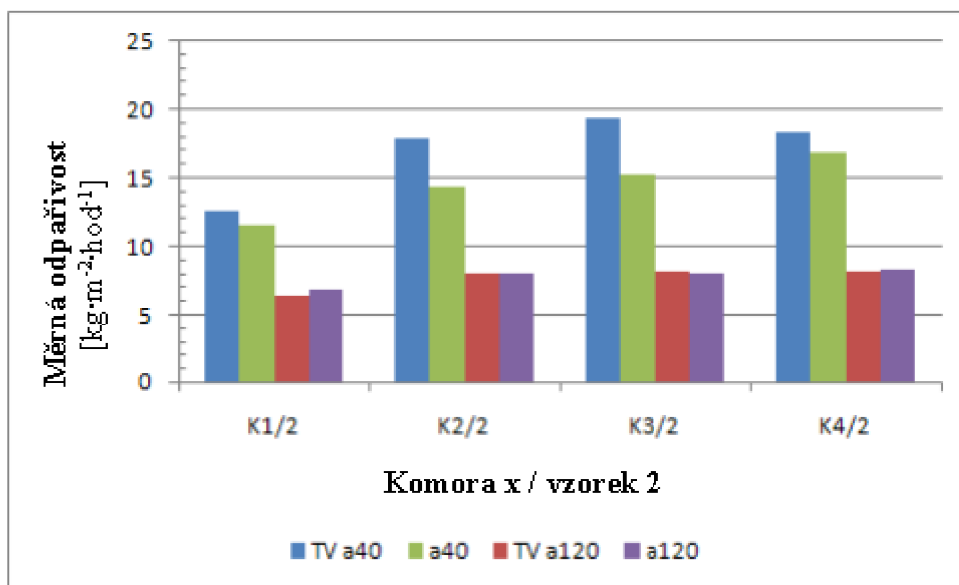
Při měření termokamerou se ukázalo, že měření měrné odpařivosti za vyšších teplot, než je teplota okolí, je nutné provádět zvlášť. Protože čas potřebný na pořízení bitmapových snímků je relativně dlouhý, jsou výsledky měrné odpařivosti zatíženy velkou chybou. Na obrázku 39 a 40 jsou uvedeny rozdíly ve stanovení měrné odpařivosti u jednotlivých vzorků hmotnostní metodou, kdy je vzorek vážen bezprostředně po vyjmutí ze sušárny, oproti vzorkům váženým po pořízení termokamerového záznamu (označeno TV).



Obrázek 39: Porovnání měrné odpařivosti jednotlivých tryskových komor v čase 20, 40 a 120 s na vzorku 1 s měrnou odpařivostí získanou při okamžitém vážení a vážení po termovizních zkouškách.

Z porovnání jednotlivých grafů je zřejmé, že rozdíly získaných měrných odpařivostí jsou až 20 %. Pro kratší časy expozice vzorku v sušárně jsou rozdíly větší. S narůstajícím časem expozice vzorku v sušárně, kdy se podstatná část vody odpaří již tam, se rozdíly takto získaných měrných odpařivostí snižují. V grafech je vždy uveden sloupec odpovídající jednotlivé komoře (K2/1 – komora 2 / vzorek 1). První část sloupce

odpovídá měrné odpařivosti měřené po termovizních zkouškách (TV a40 – odpařivost měřená po termovizi, vzorek 40 s v sušárně).



Obrázek 40: Porovnání měrné odpařivosti jednotlivých tryskových komor v čase 40 a 120 s vzorku 2 s měrnou odpařivostí získanou při okamžitém vážení a vážení po termovizních zkouškách

Z hlediska návrhů nových tryskových systémů pro sušárny plošných textilií vyplývá z provedených prací následující konstrukční doporučení.

- Jedním z důležitých hledisek při sušení textilií je rovnoměrnost sušení, které se dá docílit vhodným uspořádáním trysek v tryskové komoře. Rozmístění trysek bude rovněž závislé na tom, zda se bude jednat o kontinuální či diskontinuální sušárnu.
- Z hlediska přenosu hmoty je důležité dodržet přibližně kolmý směr proudění na textilii s vhodným odvodem nasyceného vzduchu.
- Odsávání nasyceného vzduchu nepředimenzovat, eventuálně mít možnost jej škrtnit dle potřeby technologie.
- Návrhy v první fázi podrobit numerické analýze, čímž se výrazně zlevní následný vývoj konstrukce a výroby.
- Verifikovat numerické výsledky trysek a následně i komor na menších celcích experimentem.
- Již při návrhu zohlednit výrobní náklady. Z testovaných komor je nejvýhodnější tryskový systém použitý v komoře 3 a to nikoliv z důvodu měrné odpařivosti, větší měrnou odpařivost měla komora 4, ale především z hlediska výrobních nákladů celého systému.

3.3 Návrh nové tryskové komory NK

Navrhovaná trysková komora byla vyvíjena pro podmínky sušení, kdy je sušící medium (vzduch) o nízké teplotě a nízké výtokové rychlosti. Tedy pro podmínky využití v mikrovlnné sušárně ImpactWave a to v její impaktní části. Jedná se o nízkopotenciální teplo, jehož parametry (teplota a množství) je dáno právě primární částí sušárny MicroWave (mikrovlnná část). Ohřev vzduchu je zde zajišťován ochlazováním magnetronů v mikrovlnné části. Teplota vzduchu se pak pohybuje okolo 39 °C.

3.3.1 Optimalizace geometrie soustavy trysek [5]

Výsledky analýzy kruhových trysek určených pro sušící a napínací rám ELI-TEX, která byla prováděna v SVÚSS Běchovice, byly využity pro návrh nové tryskové komory NK. Jedná se o návrh průměru trysek, jejich rozmístění v komoře a to především z hlediska maximálního sušícího výkonu. Analýza byla provedena na základě měření součinitele přenosu hmoty naftalenovou metodou. Optimalizace geometrie rozmístění kruhových trysek je provedena pomocí součinitele volné plochy.

3.3.1.1 Volba optimální rozteče trysek [5]

Optimální rozteč trysek je definována jako funkce součinitele volné plochy (rovnice 60). Tento součinitel vyjadřuje optimální poměr průtočného průřezu jedné trysky a ofukované plochy. Optimální součinitel volné plochy (rovnice 61) je funkcí, podobně jako přenosové součinitele přenosu tepla a hmoty, Reynoldsova čísla respektive rychlosti proudění, geometrie trysky a vlastností proudícího média. Charakteristický rozměr pro danou úlohu je průměr trysky (rovnice 62). Pro návrh tryskové komory určené k sušení plošné textilie můžeme použít průměrnou hodnotu optimálního součinitele plochy podle rovnice 63, respektive rovnice 64.

$$f = \frac{f_t}{F} \quad (\text{rov } 60)$$

- F – součinitel volné plochy [-]
 f_t – průtočný průřez jedné trysky [m²]
 F – plocha jedné sekce [m²]

$$f_{opt} = f(\text{Re}) \quad (\text{rov } 61)$$

- F_{opt} – optimální součinitel volné plochy [-]
 Re – Reynoldsovo číslo [-]

$$Re = \frac{w_o \cdot d \cdot \sqrt{\varepsilon}}{\nu} \quad (\text{rov } 62)$$

w_o – rychlost proudění určená v ose ústí trysky [$m \cdot s^{-1}$]

d – průměr ústí trysky [m]

ν – kinematická viskozita [$m \cdot s^{-1}$]

Pro sušení plošných textilií, kdy $w_o = (25 \div 50) m \cdot s^{-1}$, tzn. $Re = (1 \div 2) \cdot 10^4$:

$$f_{opt} = \frac{0,0128}{\varepsilon} \quad (\text{rov } 63)$$

Za předpokladu že součinitel kontrakce je $\varepsilon = 0,90$ potom:

$$f_{opt} = \frac{0,0128}{\varepsilon} = \frac{0,0128}{0,90} = 0,0142 \quad (\text{rov } 64)$$

3.3.1.2 Volba optimálního průměru trysky [5]

Pro sušení plošných textilií, kdy $w_o = (25 \div 50) m \cdot s^{-1}$, čemuž odpovídá $Re = (1 \div 2) \cdot 10^4$, je používána rovnice 65 pro stanovení optimálního průměru trysky.

$$d_{opt} = \frac{1}{5,6} \cdot \frac{s}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (\text{rov } 65)$$

d_{opt} – optimální průměr trysky [mm]

s – vzdálenost ústí trysek od sušeného materiálu [mm]

Při geometrickém uspořádání ostatních částí sušárny, především vedení řetězu nesoucí sušenou textilií je možné uvažovat $s_{min} = 60 mm$ a dále při uvažování $\varepsilon \rightarrow 1,0$ platí pro rozměr optimálního průměru trysky rovnice 66:

$$d_{opt} = 10,7 mm \quad (\text{rov } 66)$$

3.3.2 Návrh nové soustavy [5]

3.3.2.1 Počet trysek

Z rovnice 66 a následnou volbu průměru trysky $d = 11 mm$ je možné následně stanovit průtočný průřez jedné kruhové trysky podle rovnice 67. Dále při uvažování součinitele kontrakce $\varepsilon = 0,95$ je dále možné určit optimální součinitel volné plochy z rovnice 63 podle rovnice 68:

$$f_t = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,011^2}{4} = 9,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \quad (\text{rov } 67)$$

$$f_{opt} = \frac{0,0128}{\varepsilon} = \frac{0,0128}{0,95} = 0,0134 \quad (\text{rov } 68)$$

Pro stanovení odpovídajícího počtu kruhových trysek je nutné zvolit plochu tryskové komory. Nová komora NK bude porovnávána v experimentální komoře s komorou K3. Tedy plocha tryskové komory je dána plochou sušárny, respektive porovnávanými komorami. Plocha komory je $700 \times 600 \text{ mm}$, čemuž odpovídá plocha F_s :

$$F_s = 0,7 \cdot 0,6 = 0,42 \text{ m}^2 \quad (\text{rov } 69)$$

Počet kruhových trysek n_c v komoře je pak dán rovnicí 70:

$$n_c = \frac{f_{opt} \cdot F_s}{f_t} = \frac{0,0134 \cdot 0,42}{9,5 \cdot 10^{-5}} = 59 \text{ Ks} \quad (\text{rov } 70)$$

3.3.2.2 Rozteč trysek

Rozteče trysek jsou určeny pomocí optimálního součinitele volné plochy s uvažováním rozmístění trysek do rovnostranného trojúhelníka podle rovnice 71 a rovnice 72:

$$L_B = \sqrt{\frac{f_t \cdot \varepsilon}{0,87 \cdot f_{opt}}} = \sqrt{\frac{9,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,95}{0,87 \cdot 0,0134}} = 0,088 \text{ m} \quad (\text{rov } 71)$$

$$L_L = 0,87 \cdot L_B = 0,87 \cdot 0,088 = 0,076 \text{ m} \quad (\text{rov } 72)$$

3.3.2.3 Počet trysek v jedné řadě

Pro stanovení optimálního počtu trysek v jedné řadě s ohledem na šíři sušárny respektive šíři sušeného materiálu, je možné stanovit podle rovnice 73:

$$n = \frac{(B - L_A)}{L_B} = \frac{(0,7 - 0,02)}{0,088} = 8,52 \quad (\text{rov } 73)$$

$L_A = 0,02 \text{ m}$ – minimální vzdálenost první trysky od kraje komory

$B = 0,7 \text{ m}$ – maximální pracovní šíře sušárny

3.3.2.4 Počet řad v tryskové komoře

Z výše uvedeného optimálního počtu trysek v jedné řadě tryskové komory je pak možné stanovit počet řad v tryskové komoře podle rovnice 74:

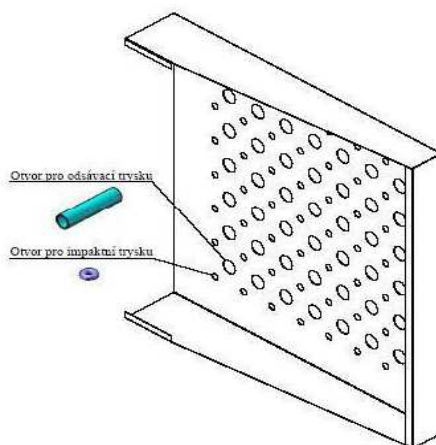
$$n_f = \frac{n_c}{n} = \frac{59}{8,5} = 6,94 \quad (\text{rov } 74)$$

3.3.3 Základní rozměry tryskové komory NK

Z technologicko–výrobních důvodů byly finální rozměry nové tryskové komory NK navrženy tak, aby se co nejvíce blížily rozměrům uvedeným v předcházejících odstavcích. Byl zvolen průměr trysky, počet trysek v komoře, počet trysek v řadě, počet řad v komoře, rozteče trysek následovně:

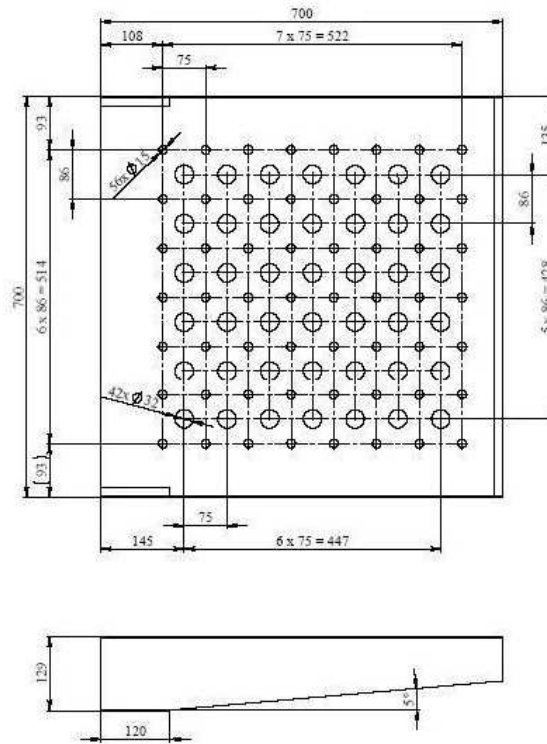
$$d = 11 \text{ mm}; \quad n_c = 56 \text{ Ks}; \quad n = 8 \text{ Ks}; \quad n_f = 7 \text{ Ks}; \quad L_B = 86 \text{ mm}; \quad L_L = 75 \text{ mm};$$

Na obrázku 41 je uvedena jedna varianta tryskové komory, kde bylo nutné dořešit navádění proudu a odvod nasyceného vzduchu.



Obrázek 41: Varianta návrhu nové komory NK

Rozměry této varianty jsou uvedeny na obrázku 42. Tato problematika byla řešena numerickou simulací proudění v software Fluent. Jednotlivé návrhy byly nejprve zpracovány v CAD systému a upraveny podle výpočtářských požadavků. Byl vytvořen inverzní model konstrukce, který představoval proudící prostředí.

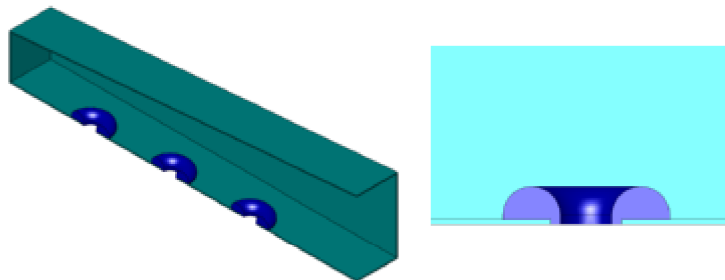


Obrázek 42: Geometrie nové komory NK

3.3.4 Návrh ústí trysky [16]

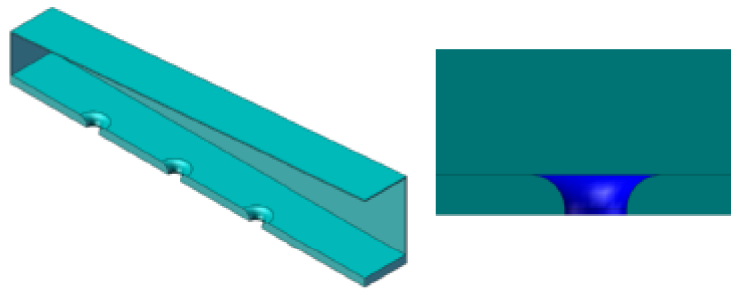
Pro vytvoření kvalitních impaktních proudů bylo provedeno numerické řešení tří modelů, které obsahovaly tři trysky v řadě. Tyto trysky byly vloženy do stejné tryskové komory a byl vyhodnocován součinitel přestupu tepla. Na obrázku 43 až 45 jsou uvedeny jednotlivé konstrukční varianty *D*, *E*, *F*.

Varianta typ *D* vychází z konstrukce ústí trysky tryskového systému Advafix (vývoj VÚTS pro Elitex k.p. Chrastava). Jedná se o usměrnění proudu do trysky pomocí torusu.



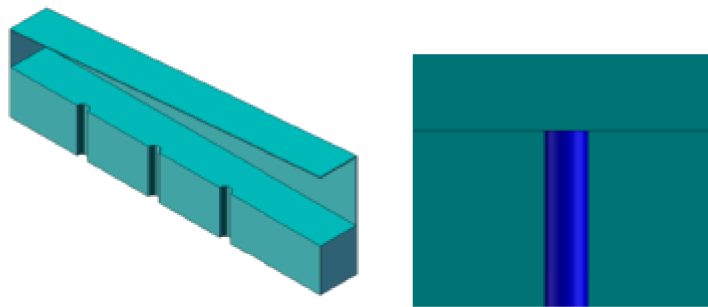
Obrázek 43: Návrh ústí trysek typ *D*

Varianta *E* využívá podobnou úpravu ústí trysky, avšak konstrukčně zhotovené odebráním materiálu z desky.



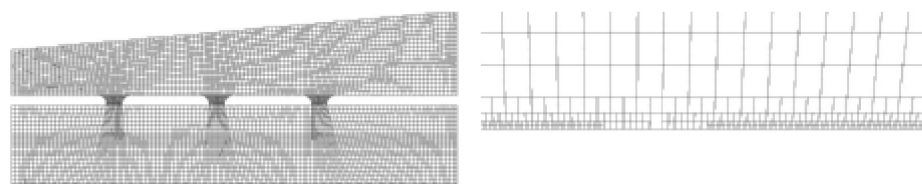
Obrázek 44: Návrh ústí trysek typ E

Varianta *F* je vybavena trubicí, jenž má za úkol narovnat proud vzduchu tak, aby dopadal kolmo na sušenou plochu. Průměr trysky je u všech třech variant stejný a je roven *11 mm*.



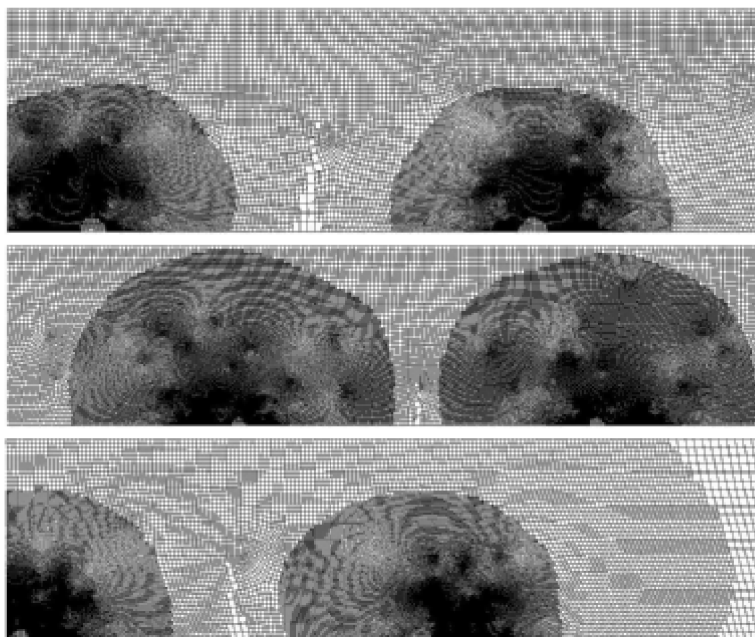
Obrázek 45: Návrh ústí trysek typ F

Pro porovnání součinitelů přenosu tepla jednotlivých variant, bylo nutné provést stejné zasíťování modelů na dopadové ploše. Sítování každého modelu bylo provedeno tak, že začíná zcela shodnou sítí v rovině výstupního otvoru a síť se pak promítá do celého výstupního prostoru. Na obrázku 46 je uvedena síť modelu varianty *E* a její detail na dopadové ploše.



Obrázek 46: Síť modelu varianty E po zjemnění a detail sítě v blízkosti stěny po zjemnění [16]

Na obrázku 47 je pak uvedena síť na dopadové ploše pro všechny tři varianty. Pouze v případě, kdy jsou sítě jednotlivých modelů stejné, je možné provést jejich porovnání, jinak jsou výsledky nepřesné. Postup tedy lze použít jen jako srovnávací – vytvořit stejnou síť, stejně zjemňovat, použít standardní výpočet a porovnat hodnoty přestupu tepla pro jednotlivé případy. Tedy jen jako poměrné hodnoty, ne absolutní. Pro numerické řešení byl na vstupu definován přetlak 750 Pa vůči okolí 0 Pa , což odpovídá teoretické výtokové rychlosti $35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Systém byl řešen jako izotermický model, tedy $T = 300 \text{ K}$ [16].



Obrázek 47: Půdorys zjemněné výpočtové sítě na dopadové ploše – varianty D1–E1–F1 [16]

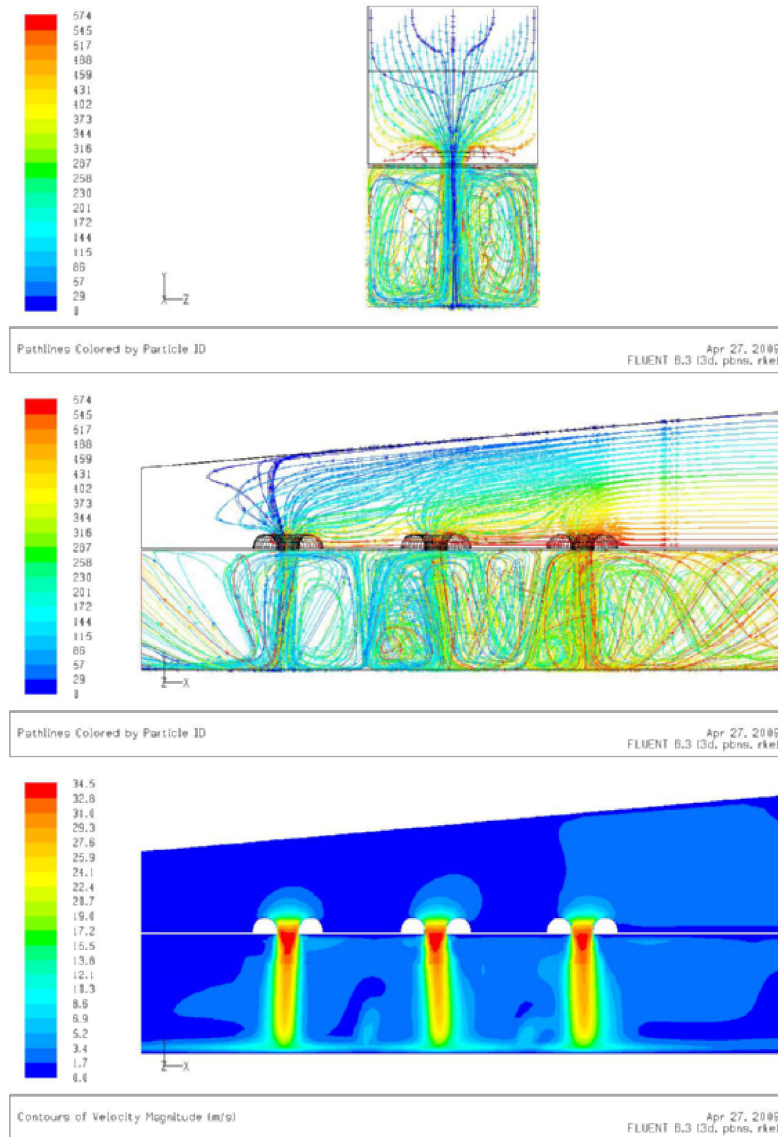
Střední hodnota součinitele přestupu tepla na dopadové ploše pak vychází pro dané provedení sítě a dané parametry proudění následovně:

Tvar ústí trysky	Součinitel přenosu tepla	
D1	150,1	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
E1	150,4	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
F1	130,1	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

Tabulka 3: Střední součinitel přenosu tepla pro trysky D1, E1 a F1 [16]

Výsledky pro variantu *D1* a *E1* jsou téměř shodné. Jedná se v podstatě o shodnou geometrii, kdy se jednotlivé varianty liší možnou technologií výroby. Výsledky součinitele přestupu tepla na dopadové ploše varianty *F1* jsou nižší (o cca 15 %), což je důsledek větší průtokové ztráty naváděcí trubicou sloužící k usměrnění proudu.

Co se týká obrazů proudění, jsou všechny případy velmi podobné. Při uvažování modelů s boční symetrií, můžeme jednotlivé výsledky zhodnotit následovně. Jelikož jsou výsledky všech variant velmi podobné, jsou na obrázku 48 uvedeny výsledky pouze pro variantu *D* [16].



Obrázek 48: Numerická simulace proudění varianty D [16]

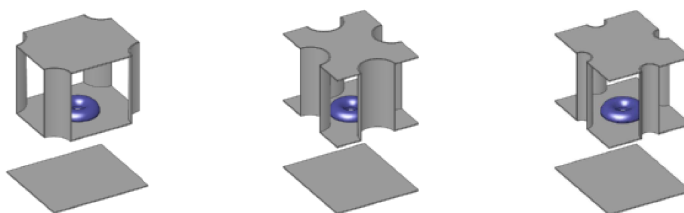
- Pole proudnic v příčném řezu komorou – je vidět pár velkých vírů, kdy se proudy ze sousedních trysek po dopadu na sušenou plochu srazí a vracejí se nahoru.
- Pole proudnic v podélném řezu komorou – je vidět složité proudění pod komorou. Výstup je tu definovaný doleva a doprava, proud z vnitřní trysky se do výstupu dostává velmi komplikovaně.
- Pole rychlosti v podélném řezu komorou – v hlavním proudu je vidět přechod mezi jemnou sítí v oblasti těsně pod tryskou a hrubší sítí ve vzdálenějším okolí.
- Pole dynamického tlaku na dopadové ploše – tendence ke zvýšení hodnot ve směru proudu přívodem.

- Pole součinitele přestupu tepla na dopadové ploše – tendence ke zvýšení hodnot ve směru proudu přívodem.

S ohledem na problematiku spolehlivosti součinitele přenosu tepla (velmi závislé na jemnosti sítě), bylo navrženo řešení pomocí uživatelských funkcí, vytvořených na základě kriteriálních vztahů přímo pro přenos hmoty. Práce přímo se součinitelem hmoty je výhodná tím, že pro oblast sušení je směřodatným kritériem množství odpařené vlhkosti (vody). Nicméně z hlediska analogie přenosu tepla a hmoty je možné pracovat i s kriteriálními rovnicemi pro přenos tepla. Blíže se této problematice věnuje zpráva [16] a [17].

3.3.5 Návrh odsávání z tryskové komory [16]

Z výsledků simulace bylo rozhodnuto dále řešit odvod již nasyceného vzduchu z komory pomocí odsávacích trysek. Jejich rozměr a umístění bylo úkolem dalšího šetření. Pro každou variantu byl vytvořen jeden element obsahující trysku a odsávací otvory (obrázek 49).



Obrázek 49: Varianty odvodu vzduchu z tryskové komory C91 – C95 – C96

Jednalo se o posouzení, zda umístit odsávací otvory dle varianty C91 či C95, a dále porovnat, zda v případě rozmístění odsávacích otvorů dle varianty C95 nezměnit průměr odsávacích otvorů, jak je navrženo u varianty C96. Pro numerickou simulaci byly uvažovány stejné parametry jako v předešlých výpočtech, tedy vstup stále stejný (700 Pa, 350 K), výstup do okolí (0 Pa, 300 K). K porovnání výsledků byla následně sestavena tabulka s hlavními výsledky (tabulka 4).

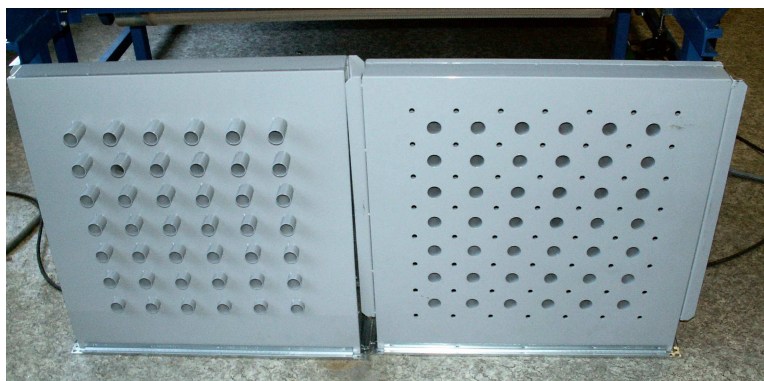
Zatímco zvětšení výstupu na dvojnásobek nemá prakticky vliv (limitním průřezem se stává vstup 11 mm), zmenšením průřezu na polovinu stoupne tlak v komoře a sníží se průtok včetně důsledků na dynamický tlak i na přestup tepla [16].

Místo	Veličina	Případ		
		C 91	C 95	C 96
Výstup	Otvor mm	30	2x30	2x15
Vstup	Otvor mm	11		
	Průtok $g \cdot s^{-1}$	3,0645	3,0963	2,885
	Rychlost $m \cdot s^{-1}$	32,06	32,4	30,2
	Tepelný tok W	161,6	159,9	150,5
Dopad	$P_{st\ stř}$ Pa	25,6	16	94,1
	$P_{d\ min}$ Pa	0,1	0,1	0,1
	$P_{d\ stř}$ Pa	91,9	96,3	90,8
	$P_{d\ max}$ Pa	189,9	189,4	164,1
	α_{min} $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	96,8	96,8	96,8
	$\alpha_{stř}$ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	174,3	175,5	175,4
	α_{max} $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	294,5	302,3	286,5

Tabulka 4: Souhrnné výsledky řešení odváděcích otvorů tryskové komory [16]

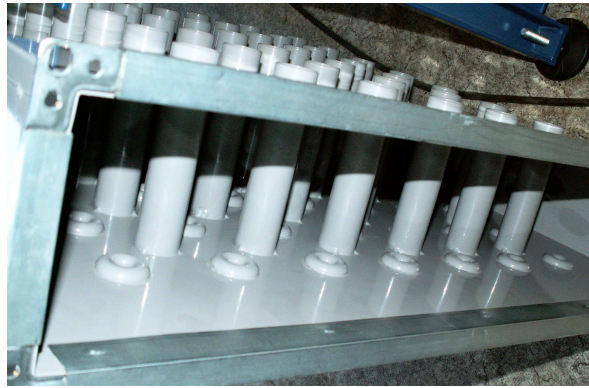
3.3.6 Konstrukce nové tryskové komory NK

Na základě numerických simulací byla provedena konstrukce nové tryskové komory využívající trysku varianty *D* a odvod vzduchu varianty *C91*. Tyto prvky byly zakomponovány do tryskové komory rozměrů $700 \times 600 \text{ mm}$ tak, aby bylo možné proměřit sušicí křivky různých textilních vzorků v dané laboratorní sušárně a porovnat výsledky z předchozím měřením. Na obrázku 50 je zobrazena vyrobená sada tryskových komor (spodní a vrchní), která byla následně porovnána s komorou K3.



Obrázek 50: Trysková komora NK – horní a spodní pohled

Na obrázku 50 vlevo jsou patrné odsávací otvory průměru 30 mm , procházející tryskovou komorou. Na obrázku 50 vpravo je patrná vzájemná poloha vstupních impaktních trysek (průměr 11 mm) a odsávacích otvorů. Na obrázku 51 je pak detail vnitřní části tryskové komory, kde jsou zobrazeny naváděcí trysky.



Obrázek 51: Trysková komora NK – vnitřní uspořádání

3.3.7 Experimentální stanovení parametrů komory NK

3.3.7.1 Měření rovnoměrnosti výtokových rychlostí

Trysková komora NK byla kontrolována z hlediska rovnoměrnosti výtokových rychlostí z jednotlivých trysek. Měření bylo provedeno pomocí Prandtlovy sondy a tlakoměru PV100 AirFlow. Výtoková rychlost byla měřena v ústí trysky při teplotě 35 °C a relativní vlhkosti 20 %. Otáčky ventilátoru byly nastaveny potenciometrem na hodnotu $n = 2870 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. V tabulce 5 a 6 jsou uvedeny výtokové rychlosti vzduchu pro jednotlivé trysky spodní a horní komory.

Spodní	1	2	3	4	5	6	7	8
A	47,2	47,5	47,7	48,2	48,2	48	47,2	47,5
B	47,3	47,6	48	47,6	48,3	48,4	48	47,4
C	47,1	47,9	47,4	47,5	48,1	48	48	48,1
D	47,1	47,8	47,3	47,1	47,9	47,4	47,8	47,7
E	47,2	47,1	46,8	46,6	47,5	46,8	47,8	46,8
F	47,1	46,9	47	46,8	46,6	47,7	46,7	47,5
G	47,3	47,2	46,7	46,9	46,7	46,7	46,8	46,9

Tabulka 5: Trysková komora NK spodní – měření výtokové rychlosti na jednotlivých tryskách

Horní	1	2	3	4	5	6	7	8
A	46,9	46,9	47	47	47	47,1	47	47,2
B	47	47,1	47	46,9	45,1	47,1	47,1	47,6
C	46,9	46,8	46,9	47,1	47,1	47	48	47,1
D	47	47,1	46,9	49,4	46,2	46,9	46,9	47,2
E	46,8	47	46,9	47	46,9	46,7	46,9	47,2
F	47,1	46,8	47,1	47	47,3	46,9	47,2	47,1
G	46,8	47	47	46,9	47,1	47,1	47,3	47,7

Tabulka 6: Trysková komora NK horní – měření výtokové rychlosti na jednotlivých tryskách

Průměrná výtoková rychlost vychází pro dané podmínky pro spodní komoru následovně:

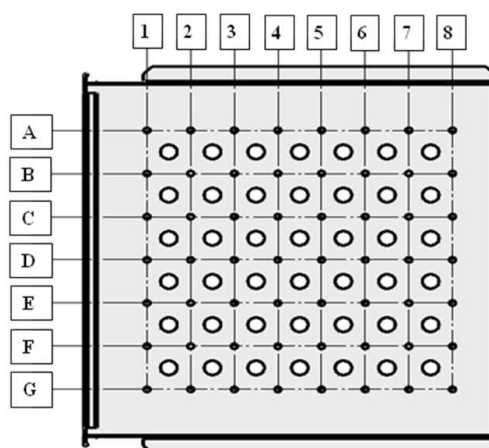
$$w = \bar{w} \pm 3 \cdot \delta = 47,4 \pm 1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (\text{rov } 75)$$

Což představuje odchylku mezi jednotlivými tryskami spodní komory $\pm 3,15 \%$.

Průměrná výtoková rychlost horní tryskové komory je pak:

$$w = \bar{w} \pm 3 \cdot \delta = 47,0 \pm 1,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (\text{rov } 76)$$

Což představuje odchylku mezi jednotlivými tryskami spodní komory $\pm 3,03 \%$.

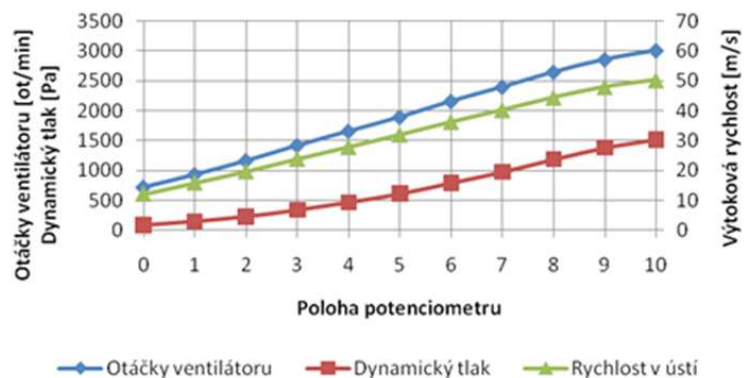


Obrázek 52: Označení polohy trysek na tryskové komoře NK

3.3.7.2 Měření závislosti výtokové rychlosti na otáčkách ventilátoru

Následně byla proměřena závislost výtokové rychlosti vzduchu z trysek na otáčkách ventilátoru (obrázek 53), jenž odpovídá nastavení potenciometru frekvenčního měniče.

Z grafu je možné odečíst pro požadovanou výtokovou rychlost polohu potenciometru měniče frekvence ventilátoru a otáčky ventilátoru. Následným porovnáním dynamického tlaku odečteného z grafu s hodnotou změřenou pomocí Prandtlovy sondy v ústí trysek je možné systém doladit přesně.



Obrázek 53: Závislost otáček ventilátoru, dynamického tlaku a rychlosti vzduchu v ústí trysky na poloze regulačního potenciometru

3.3.8 Měření sušicích křivek

3.3.8.1 Podmínky měření sušicích křivek

Pro porovnání komory NK (nová komora) a komory K3, bylo provedeno měření sušicích křivek a to pro dva textilní materiály. Jednalo se o vzorky rozměru 49×49 cm, což odpovídá ploše vzorku $0,24$ m². Oba vzorky byly stejného materiálového složení, avšak různé plošné hmotnosti:

- **Vzorek 1** – Vlna–Pes 45/55, 173 g·m⁻²
- **Vzorek 2** – Vlna–Pes 45/55, 275 g·m⁻²

Měření probíhalo za podmínky stejného pracovního bodu ventilátoru. Odpovídající průtočné množství vzduchu ventilátorem činilo $0,496$ m³·s⁻¹. Jelikož obě komory nemají shodné průměry trysek, bylo nutné pro dosažení stanovené podmínky u komory K3 (trysky o průměru 13 mm), některé otvory zaslepit plastovými zátkami. Zaslepením některých otvorů byl nastaven přibližně shodný statický tlak na výstupu z ventilátoru jako u komory NK (má menší počet trysek a průměr trysek (11 mm), než komora K3). Doladění systému do stejného pracovního bodu ventilátoru u obou tryskových komor bylo provedeno nepatrnou změnou polohy potenciometru frekvenčního měniče. Statický tlak měřený na výstupu z ventilátoru měl hodnotu 1410 Pa, poloha potenciometru frekvenčního měniče 10, otáčky ventilátoru byly změřeny u komory NK $n_{NK} = 3020$ ot·min⁻¹ a u komory K3 $n_{K3} = 3005$ ot·min⁻¹. Výtokové rychlosti jednotlivých systémů se mírně lišily. Teplota sušárny byla nastavena a dále udržována regulátorem na hodnotě 80 °C. Vzdálenost spodní a horní tryskové komory byla nastavena na hodnotu 120 mm.

3.3.8.2 Postup měření sušicích křivek

Měření sušicích křivek probíhalo dle následujícího postupu:

- Máčení vzorků ve vodě
- Odmačknutí vzorků pomocí fulárdy
- Vložení vzorku do sáčku a utěsnění sáčku
- Zvážení sáčku se vzorkem – hodnota $M_1 + M_{Sa}$
- Vyjmutí vzorku ze sáčku a vložení do sušárny na stanovenou dobu – hodnota τ
- Vyjmutí vzorku ze sušárny a vložení do sáčku a utěsnění
- Zvážení vzorku se sáčkem – hodnota $M_2 + M_{Sa}$
- Vyjmutí vzorku ze sáčku a zvážení sáčku – hodnota M_{Sa}

Tento postup byl opakován pro odpovídající zvolené časy, dokud nebyl textilní vzorek usušen. Z odměřených hodnot pak byla sestrojena sušicí křivka daného vzorku (usušeného na dané komoře). Podle následujících hodnot pak byla naměřená data zpracována do tabulky a následně vynesena do grafu.

Z hmotnosti odmačnutého vzorku a hmotnosti sáčku byla vypočítána hmotnost vlhkého vzorku:

$$M_1 = (M_1 + M_{Sa}) - M_{Sa} \quad [g] \quad (\text{rov } 77)$$

Podobně byla počítána hmotnost vzorku po vyjmutí ze sušárny:

$$M_2 = (M_2 + M_{Sa}) - M_{Sa} \quad [g] \quad (\text{rov } 78)$$

Dále pak byla stanovena hmotnost suchého materiálu (sušiny) M_s a to tak, že daný vzorek byl sušen při výše popsaných podmínkách 30 min. Z těchto hodnot již bylo možné vypočítat vlhkost materiálu před sušením u_1 a po sušení u_2 dle následující rovnice:

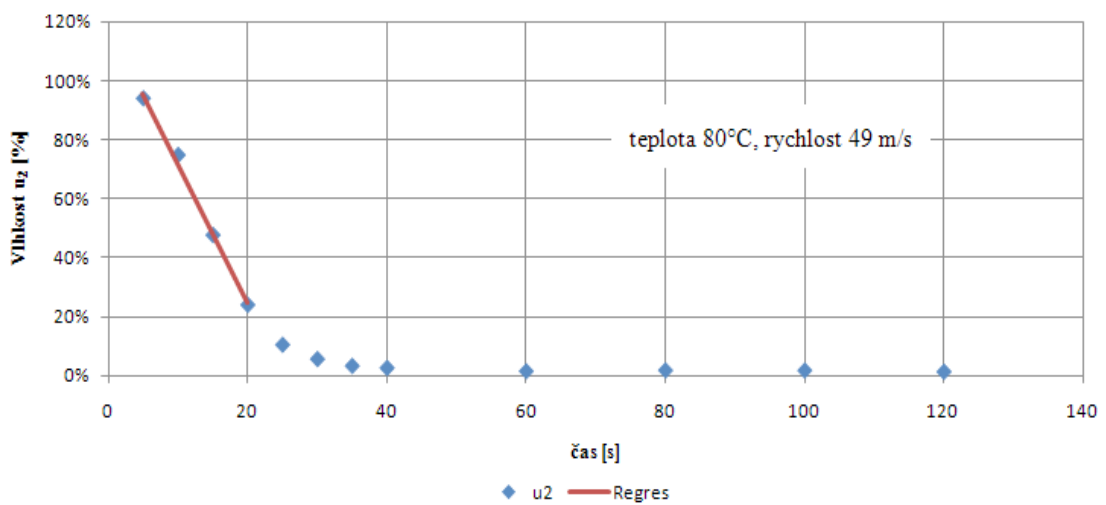
$$u_i = \frac{M_i - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad [\%] \quad (\text{rov } 79)$$

Sušicí křivka (závislost vlhkosti u_2 na čase τ), pak byla vynesena do grafu. Z průběhu sušicí křivky, v oblasti konstantní rychlosti sušení, byla provedena lineární regrese pomocí metody nejmenších čtverců a to právě pro lineární oblast křivky. Line-

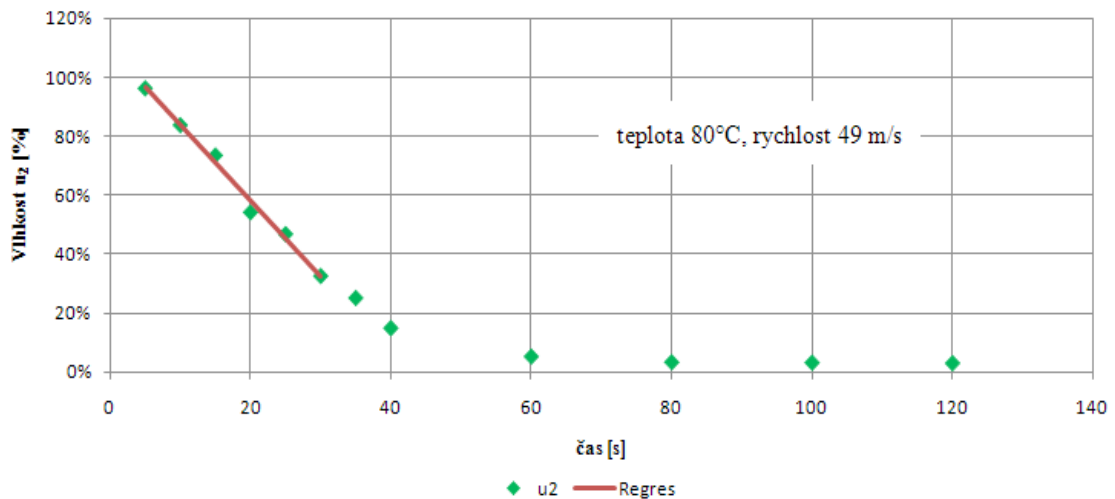
árnímu úseku sušící křivky odpovídá konstantní rychlost sušení a , která je násobkem směrnice lineární části funkce $u_2(\tau)$.

$$a = -\frac{G_s}{S} \cdot \frac{du_2}{d\tau} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}] \quad (\text{rov } 80)$$

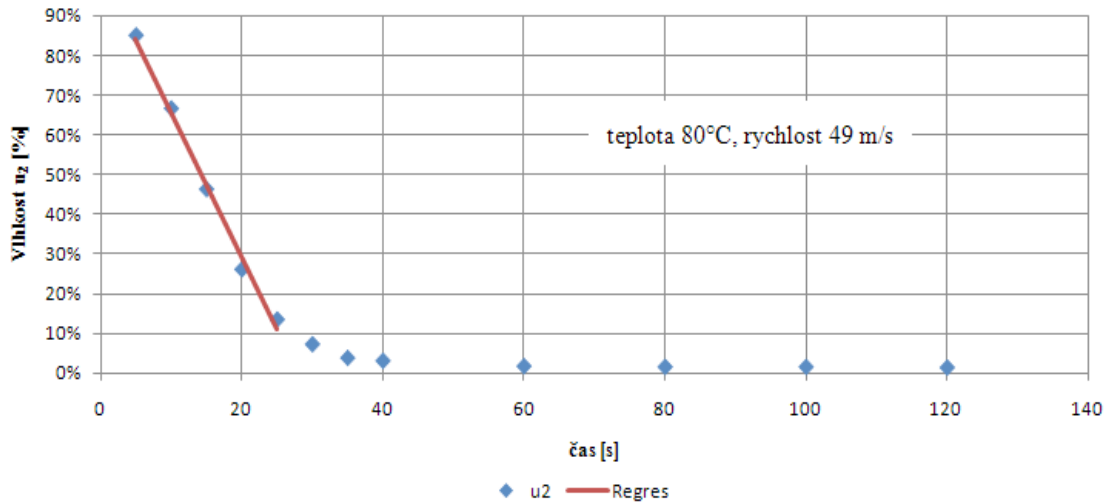
Plocha $S [m^2]$ je plocha sušeného vzorku. Směrnice lineární části funkce $u_2(\tau)$ odpovídá sklonu regresní přímky. V grafech sušících křivek je pak uvedena i lineární regrese pro lineární úsek křivky (červenou barvou). Jednotlivé výsledky jsou uvedeny v grafech 54 až 57. V tabulce 7 je pak provedeno porovnání jednotlivých rychlostí sušení pro jednotlivé vzorky a komory. Jedná se o průměrné hodnoty rychlosti sušení.



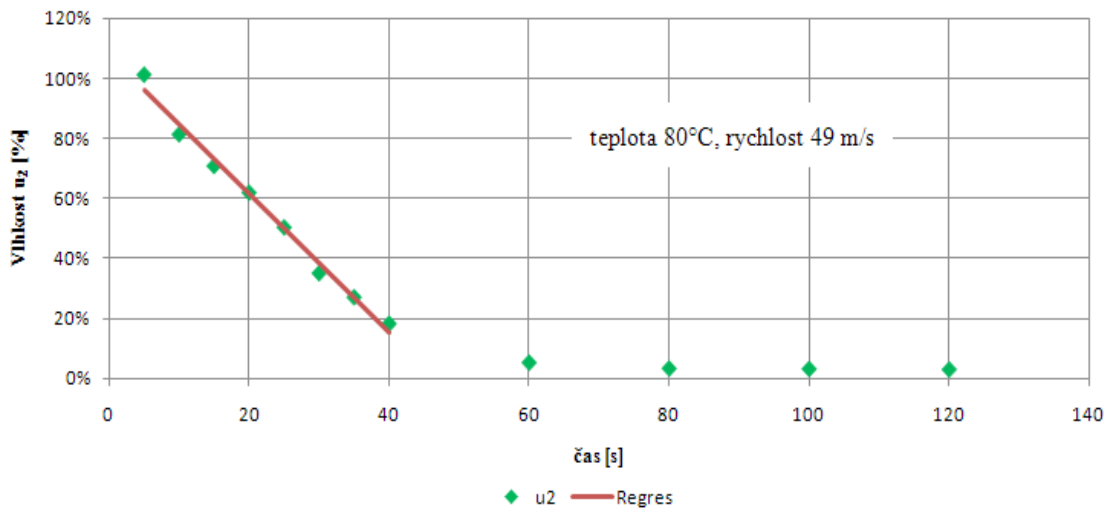
Obrázek 54: Sušící křivka vzorků 1 měřená na tryskové komoře NK



Obrázek 55: Sušící křivka vzorků 2 měřená na tryskové komoře NK



Obrázek 56: Sušící křivka vzorků 1 měřená na tryskové komoře K3



Obrázek 57: Sušící křivka vzorků 2 měřená na tryskové komoře K3

	Komora NK		Komora K3	
	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 1	Vzorek 2
Sklon lineární regrese	-0,04741	-0,02562	-0,03931	-0,02388
Rychlost sušení [kg.m ² .hod ⁻¹]	24,9	21,3	20,6	19,9

Tabulka 7: Porovnání rychlosti sušení jednotlivých vzorků a komor

3.3.9 Diskuse výsledků návrhu nové komory NK

Cílem prací bylo vyvinout novou tryskovou komoru, jejíž parametry by dovo-
lovaly zvýšit sušící výkon impaktní části mikrovlnné sušárny ImpactWave. V této
impaktní části se využívá odpadního ztrátového tepla vznikajícího při chlazení
magnetronů. Jedná se zde především o využití odpadního vzduchu o nízké teplotě
a malém množství.

Návrh sušicí komory byl prováděn pomocí numerických metod, konkrétně pomocí software Fluent. Z hlediska proudění a potažmo z hlediska přenosu tepla, byla nejprve řešena otázka ústí trysek. Následně pak byla řešena problematika vzájemného ovlivňování jednotlivých proudů v tryskové komoře. Byly navrženy odsávací trysky tak, aby byla kvalita impaktních proudů co nejvýhodnější. To znamená, aby jednotlivé impaktní proudy dopadaly na sušený materiál kolmo. Toho bylo docíleno tím, že byly odsávací trysky umístěny mezi jednotlivé vstupní trysky.

V průběhu numerického řešení byly sledovány nesrovnalosti při vyhodnocování součinitele přenosu hmoty pomocí stěnové funkce. Pro korektní porovnání bylo důležité, aby síť jednotlivých modelů byla přibližně stejná. To je však pro různé tryskové systémy nereálné. Z těchto důvodů bylo navrženo k řešení použít uživatelských funkcí a místo vyhodnocování součinitele přenosu tepla byl vyhodnocován rovnou součinitel přenosu hmoty a to zavedením kritériálních rovnic. Více o této problematice je uvedeno v [16] a [17].

Z provedených měření nové komory NK lze konstatovat, že rovnoměrnost výtokových rychlostí vzduchu z trysek je velice dobrá. Rozdíly mezi jednotlivými tryskami se pohybují do $\pm 3 \%$ (pro výtokovou rychlost $48 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Po změření sušicích křivek dvou vzorků materiálu na komorách NK a K3 a následném vyhodnocení rychlosti sušení bylo možno konstatovat, že sušicí výkon komory NK je pro materiál Vlna–Pes 45/55, $173 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (vzorek 1) vyšší o 21% a pro materiál Vlna–Pes 45/55, $275 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (vzorek 2) vyšší o 7% než u komory K3.

Z technologického hlediska výroby nové komory NK se jedná o relativně složitou konstrukci. Navedení jednotlivých proudů do tryskové komory (tvar ústí trysky typ *D* obrázek 44) je možné výrobně zjednodušit technologií lisování, kdy by bylo nutné navrhnout vhodný lisovací nástroj, který by vytvořil na rovném plechu odpovídající profil (viz. Kapitola 2.6.2). Při výrobě komory NK se jako nejvíce pracné, což v důsledku komoru prodražuje, jeví výrobní provedení odsávacích kanálů podle obrázků 49 a 51. Proto bylo rozhodnuto, že trysková komora pro impaktní část mikrovlnné sušárny ImpaktWave bude využívat systém navádění jednotlivých proudů podle tvaru ústí trysky typ *D*, které budou zhotoveny vlepením soustruženého dílu, jako v komoře NK, avšak odsávání bude řešeno dělením tryskové komory na více částí. To bude mít za následek odvod nasyceného vzduchu mezerami mezi jednotlivými tryskovými komorami.

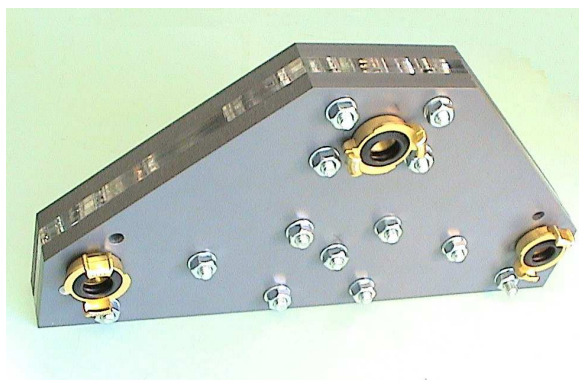
3.4 Tryskový systém vybavený pulsačním oscilátorem

Další možností zvýšení sušicího výkonu klasických impaktních tryskových systémů spočívá v dynamice vytváření mezní vrstvy v okolí stagnační oblasti proudění. Mezní vrstva vznikající při impaktním sušení je hlavní překážkou při přenosu tepla do sušeného materiálu. Tato tenká vrstva funguje jako izolace. V tryskových systémech impaktních sušáren je snaha tuto mezní vrstvu rozbít a tím zvýšit sušicí výkon celého procesu. Proto byla provedena konstrukce pulsátorů, které měly za úkol rozrušovat mezní vrstvu vznikající mezi dopadajícím proudem ohřátého vzduchu a sušeným plošným textilním materiálem. Pro rozrušování mezní vrstvy bylo uvažováno o použití fluidického oscilátoru nebo mechanického oscilátoru. Pulsační oscilátory pak byly z konstrukčních dispozic jednotlivých tryskových komor implementovány do Komory 1 (kapitola 3.1.1.1).

3.4.1 Fluidický oscilátor [18]

Možný způsob jak docílit zvýšení přenosových součinitelů se jeví rozrušení mezní vrstvy pomocí pulsujících proudů vyvolaných právě fluidickým oscilátorem.

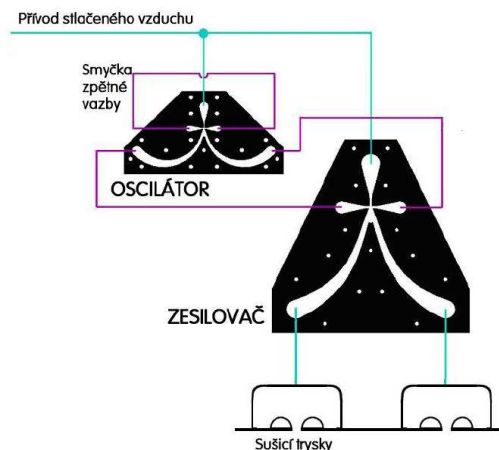
Pro porovnávací zkoušku byl k dispozici fluidický oscilátor AVČR (obrázek 58), jehož tvůrcem je prof. Ing. Václav Tesař CSc. Zapojení fluidického oscilátoru bylo principiálně navrženo dle obrázku 59, kdy pomocí oscilátoru je řízena frekvence zesilovače. Pomocí smyčky zpětné vazby je nastavována frekvence oscilací.



Obrázek 58: Fluidický oscilátor prof. Ing. Václava Tesaře CSc. [18]

Při zapojování fluidického oscilátoru bylo konstatováno, že zdroj tlakového vzduchu pro uspořádání dle obrázku 59 je nedostatečný. Pro porovnání sušicích výkonů na tryskových systémech z předchozích měření je potřeba ofukovat plochu minimálně $0,24 \text{ m}^2$. Tomu odpovídá 30 trysek v jedné komoře, kdy se předpokládá ofukování vždy 15 tryskami. Průměr ústí trysky je 11 mm. Při uvažování součinitele kontrakce 0,95 a výtokové rychlosti vzduchu z ústí trysky $49 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ vychází požadované množství vzdu-

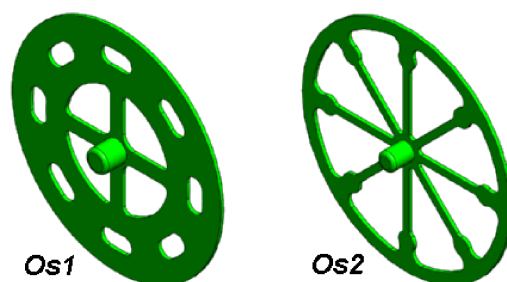
chu cca $2 \times 239 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ (horní a spodní komora). Při účinnosti kompresoru 0,6 a požadovaném tlaku 0,6 MPa, vychází požadovaný výkon kompresoru přes 100 kW. Pro taková množství vzduchu, která jsou potřebná pro sušení textilních plošných materiálů v impaktních sušárnách, je použití fluidického oscilátoru podle schématu na obrázku 59 nemožné. Odhadnutý příkon kompresoru je přibližně 3–krát větší než příkon samotné experimentální sušárny. Dále se nedá předpokládat, že by se sušicí výkon zvýšil natolik, aby energetická spotřeba pro takovéto uspořádání byla pokryta navýšením sušicího výkonu.



Obrázek 59: Uspořádání fluidického oscilátoru se zesilovačem [18]

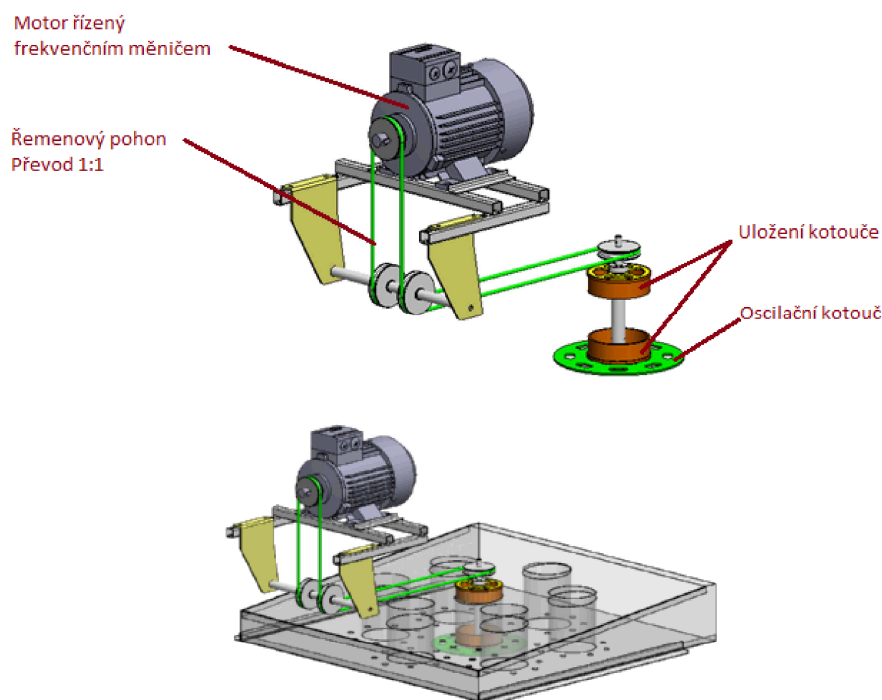
3.4.2 Mechanický oscilátor

Z několika možných způsobů vytváření pulsací bylo vybráno řešení využívající vnější kotouče, které s danou frekvencí přerušují impaktní proudy těsně za výstupem z tryskové komory. Byla provedena konstrukce dvou oscilačních kotoučů podle obrázku 60. Oscilační kotouč Os1 byl konstruován tak, aby doba otevření proudu byla stejná jako doba zastínění proudu. Oscilační kotouč Os2 byl koncipován tak, že doba zastínění odpovídala průměru trysky zvětšené o 2 mm a tudíž doba otevření byla podstatně delší, přibližně 1:8. Tvary oscilačních kotoučů jsou uvedeny v příloze 3.



Obrázek 60: Oscilační kotouče

Tyto oscilační kotouče pak byly vloženy do sestavy oscilačního zařízení, která byla dále instalována do sušárny podle obrázku 61. Frekvence oscilací impaktních proudů pak byla měněna pomocí frekvenčního měniče změnou otáček motoru.



Obrázek 61: Mechanický oscilátor řízený otáčkami motoru

Měření probíhala postupně pro různé hodnoty oscilací, a to 0 Hz , 10 Hz , 20 Hz a 30 Hz . Výstupní rychlost proudů z trysek byla cca $50\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a teplota vzduchu cca $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Plocha sušeného vzorku byla $0,247\text{ m}^2$. Průměry oscilačních kotoučů byly stejné a to 200 mm . Trysková komora byla upravena tak, že byly zaslepeny všechny trysky kromě těch, které byly uprostřed komory vybavené mechanickým oscilátorem. Sušený materiál byl tedy ofukován sedmi tryskami průměru 13 mm . Spodní komora byla zaslepena celá. Zaslepení klasických impaktních trysek bylo provedeno z důvodu stanovení vlivu pulsátoru na sušicí výkon bez ovlivňování sousedních trysek provozovaných bez pulsátorů.

3.4.3 Měření rychlosti sušení

Postup stanovení rychlosti sušení byl následující. Nejdříve byla nastavena rychlost proudění vzduchu z trysek pomocí Prandtlovy sondy. Potom probíhalo zahřívání sušárny na stanovenou teplotu přibližně 30 minut . Následovala kontrola nastavení rychlosti proudění vzduchu tryskou. Vlastní měření pro jednotlivé frekvence pulsací,

nastavené pomocí otáček motoru frekvenčním měničem, probíhalo podle postupu uvedeného v kapitole 3.3.8.2.

Na závěr měření byla stanovena hmotnost suchého materiálu M_s sušením vzorku cca 30 minut v sušárně. Před vlastním sušením byla stanovena planimetricky plocha sušeného vzorku S v m^2 . Hodnoty z jednotlivých měření byly tabelovány a zpracovány pomocí programu Excel.

Při stanovení sušicí křivky je nutné dodržet konstantní vstupní vlhkost u_1 . Tento požadavek lze splnit pouze v případě kontinuálního měření, kdy sledujeme úbytek vlhkosti v době sušení, tedy přímo v sušárně. V případě, kdy proudící vzduch z trysek generuje nepravidelné silové účinky na plochu textilie a není tedy možné provést měření hmotnosti vzorku v sušárně, je nutné provádět vážení vzorků mimo sušárnu. Jednotlivé body sušicí křivky jsou tedy získány sušením právě odměčknutého vzorku a prodloužením času expozice daného vzorku v sušárně. Pro každý bod sušicí křivky je použit vždy nově odměčknutý textilní vzorek. Pro odměčkování sušených textilních vzorků byla využita foulárdová část jiného stroje (princip viz obrázek 1, kapitola 2.2.1). I při použití strojního pneumatického odměčkování sušených vzorků není možné dodržet konstantní vstupní vlhkost. Průměrná vstupní vlhkost u_1 pro všechna měření, tedy pro všechny frekvence a oba pulsátory, je $u_1 = 97,2 \%$ se směrodatnou odchylkou $\delta = 2,2 \%$.

V tabulce 8 jsou uvedeny minimální a maximální vstupní vlhkosti u_1 pro jednotlivé sušicí křivky dané komory s odpovídajícím oscilátorem pulsujícím danou frekvencí f [Hz].

Minimální a maximální vstupní vlhkost u_1						
Měření	min u_1	max u_1	kom. min	kom. max	celk. min	celk. max
K1OS1-0Hz	96,5%	103,1%	95,6%	104,6%	94,0%	104,6%
K1OS1-10Hz	96,2%	100,8%				
K1OS1-20Hz	97,7%	104,6%				
K1OS1-30Hz	95,6%	100,5%				
K1OS2-0Hz	94,7%	98,5%	94,0%	98,5%		
K1OS2-10Hz	94,0%	98,1%				
K1OS2-20Hz	94,4%	98,2%				
K1OS2-30Hz	94,2%	98,4%				

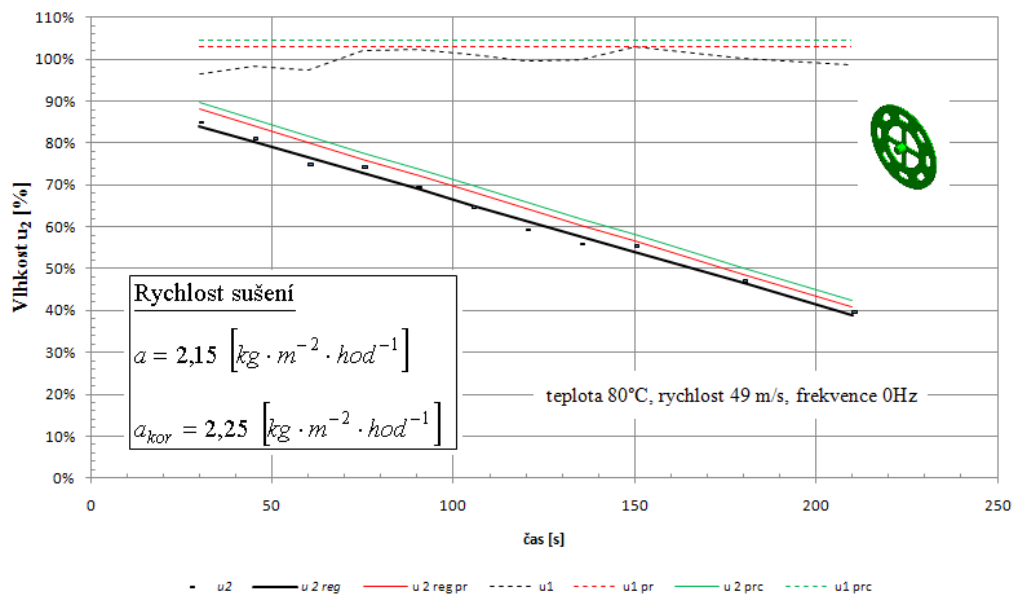
Tabulka 8: Vstupní vlhkost u_1 jednotlivých měření

Rozklíčování označení měření je následující:

- Kxy** – komora xy
- Osxy** – oscilátor xy
- xyHz** – frekvence pulzací
- Označení K1OS1-10Hz** – komora 1, oscilátor OS1, frekvence pulzací 10 Hz.

Z důvodu malé ofukované plochy sušených vzorků tohoto experimentu je nutné minimalizovat chyby způsobené rozdílnou počáteční vlhkostí materiálu. Proto pro porovnání všech sušících křivek a následně pak rychlostí sušení pro všechna měření jsou jednotlivé sušící křivky korigovány na stejnou vstupní vlhkost $u_1 = 104,6 \%$.

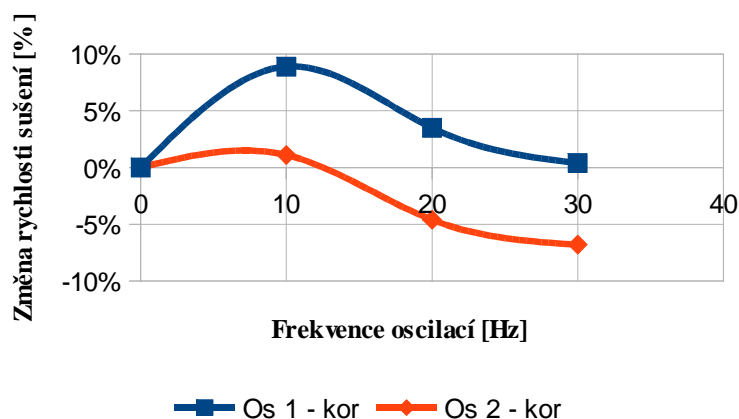
Sušící křivky z jednotlivých měření jsou uvedeny v příloze 2. V grafu na obrázku 62 je zobrazena sušící křivka komory K1 vybavená oscilátorem OS1 bez rotace (0 Hz). Při měření byl oscilátor nastaven tak, aby neovlivňoval proudy vystupující z tryskové komory. Teplota vzduchu byla udržována na $80 \text{ }^\circ\text{C}$ a výstupní rychlost vzduchu byla nastaveny na $49 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Sušen byl vzorek 2, Vlna–PES 45/55, $275 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. Jednotlivé hodnoty výstupní vlhkosti textilie u_2 jsou proloženy přímkou určenou regresní analýzou (přímka u_{2reg} – černá barva). Stejnou barvou čárkovanou křivkou je zobrazena vstupní vlhkost u_1 . Z důvodu nerovnoměrné vstupní vlhkosti u_1 je provedena korekce na konstantní vstupní vlhkost u_{1pr} , která odpovídá maximální hodnotě pro dané měření (čára čárkovaná červená), a následně jsou přepočítány naměřené hodnoty výstupní vlhkosti u_2 na u_{2pr} . Pro tato data (u_{2pr}) je provedena regresní analýza a výsledek je vynešen do grafu jako sušící křivka u_{2regpr} (červená přímka). Pro účely porovnání jednotlivých měření mezi sebou je nutné provést korekci vstupní vlhkosti u_1 na vstupní vlhkost u_{1prc} , která odpovídá maximální hodnotě ze všech měření obou typů oscilátorů. Porovnávací sušící křivka $u_{2regprc}$ (zelená přímka) je opět získána regresní analýzou z vy počítaných hodnot u_{2prc} .



Obrázek 62: Sušící křivka komory K1 osazené oscilátorem OS1 pulsujícím frekvencí 0 Hz, sušený vzorek 2

Sklon přímek u_{2regpr} a u_{2prc} je stejný, proto i rychlost sušení a_s je pro obě přímky stejná. Z přímky u_{2prc} však můžeme určit, jak by klesala výstupní vlhkost u_2 sušeného vzorku v čase, kdyby jeho vstupní vlhkost byla $u_1 = 104,6 \%$, což odpovídá naší porovnávací vstupní vlhkosti u_1 .

Vyhodnocení obou oscilátorů z hlediska rychlosti sušení v závislosti na frekvenci pulsací je uvedeno v grafu na obrázek 63. Z křivek je patrné, že rychlost sušení je v případě oscilátoru OS1 výrazně vyšší, a to až o cca 9 % při frekvenci oscilací 10 Hz, oproti sušení stacionárními impaktními proudy. V případě druhého oscilátoru OS2 je zvýšení rychlosti sušení výrazně menší. To je způsobeno nedostatečným oddělením jednotlivých proudů mezi jednotlivými pulsy, kde hraje svoji významnou roli rozpínatost sušicího vzduchu. Rozdělování proudů bylo sledováno na jedné trysce, do níž byla přiváděna směs vzduchu a kouře.



Obrázek 63: Porovnání rychlosti sušení pro oscilátory OS1 a OS2

Porovnání výsledků je provedeno, nikoliv v absolutních hodnotách rychlosti sušení, ale v procentuální změně rychlosti sušení oproti frekvenci 0 Hz. Tato frekvence odpovídá sušení stacionárními impaktními proudy. Absolutní hodnoty rychlosti sušení jsou uvedeny v tabulce 9 a rovněž v příloze 2 u každé sušicí křivky.

Frekvence oscilací Hz	Rychlost sušení			
	Os 1 - kor		Os 2 - kor	
	kg·m ⁻² ·hod ⁻¹	změna	kg·m ⁻² ·hod ⁻¹	změna
0	2,25	0,0%	2,13	0,0%
10	2,45	8,9%	2,15	1,1%
20	2,33	3,5%	2,03	-4,6%
30	2,26	0,4%	1,98	-6,8%

Tabulka 9: Absolutní rychlost sušení oscilátorů OS1 a OS2, a procentuální změna rychlosti sušení oproti stacionárnímu proudění

Absolutní hodnoty rychlosti sušení jsou relativně nízké a to z toho důvodu, že úbytek vlhkosti v čase je vztažen na celou plochu sušeného vzorku. Jelikož však plocha

vzorku odpovídá ploše tryskové komory osazené sedmkrát větším počtem trysek a ofukováním z horní i spodní komory, dá se předpokládat, že absolutní rychlost sušení by se měla v případě zprovoznění všech trysek obou komor vybavených oscilátorem několikanásobně zvýšit. Ověření tohoto předpokladu je výsledkem dalších prací.

3.4.4 Diskuse výsledků

Při podrobném měření rychlosti sušení textilního vzorku v sušárně vybavené jedním mechanickým oscilátorem byla získána data, z kterých lze usuzovat, že sušení pulzujícími impaktními proudy je intenzivnější oproti sušení stacionárními impaktními proudy. Tento poznatek koresponduje se studii prováděnými s ofukovanou pevnou deskou (např. [4]). V případě plošných textilních materiálů, kdy při sušení dochází ke značnému kmitání dopadové plochy, tento závěr nebyl nikde publikován. Ze zpracovaných naměřených dat lze usuzovat na možnost zvýšení sušicího výkonu pomocí pulzujících proudů více jak o 10 %.

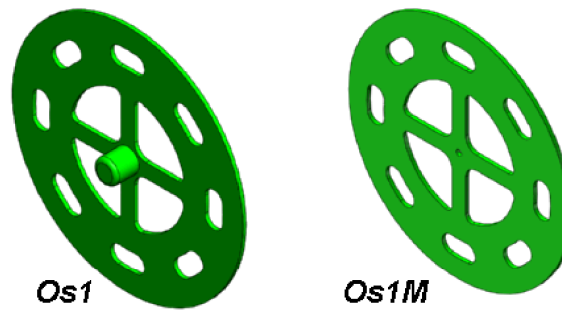
Pro ověření je nutné provést osazení všech trysek v obou komorách oscilátorem OS1. Měření takto vybavených tryskových komor měla potvrdit nebo vyvrátit možné zvýšení sušicího výkonu v řádech několika desítek procent při sušení plošných textilních materiálů. Je otázka, do jaké míry je sušicí výkon pulzujícími impaktními proudy ovlivněn sousedními tryskami.

3.4.5 Konstrukce soustavy mechanických oscilátorů

Byl proveden návrh, konstrukce a výroba mechanických oscilátorů. Tyto oscilátory byly instalovány na každou trysku v horní a spodní tryskové komoře. Měřením rychlosti sušení při nulové frekvenci oscilací impaktních proudů a při frekvenci 10 Hz mělo být ověřeno zvýšení sušicího výkonu, který byl naměřen právě při 10 Hz pulsací jednou sadou trysek v horní tryskové komoře v předchozích měření (kapitola 3.4.3).

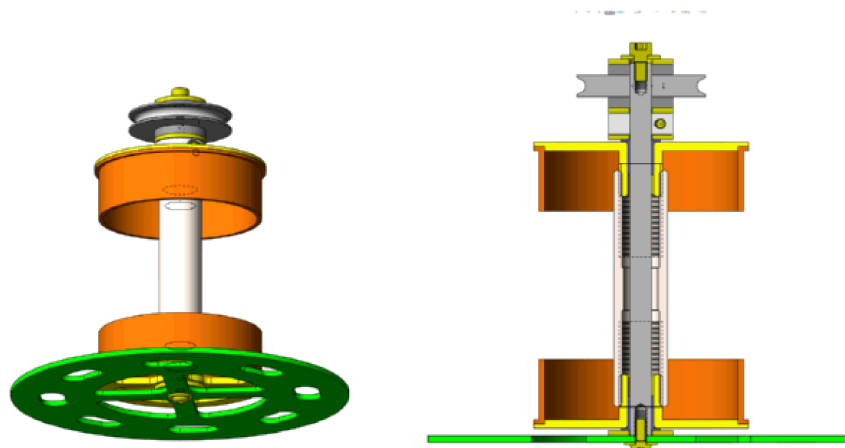
3.4.5.1 Konstrukční uspořádání mechanických oscilátorů

Tvar oscilujícího kotouče vychází z tvaru Os1 (obrázek 64), který byl použit při měřeních s jedním oscilátorem umístěným ve středu tryskové komory. Z důvodu montáže kotoučů do sušárny je tvar modifikován na tvar Os1M. Poměr otevření a uzavření proudu zůstal 1:1.



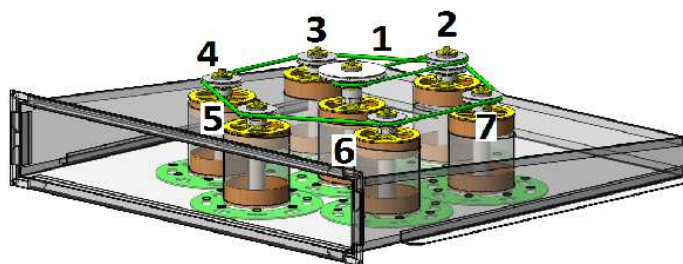
Obrázek 64: Oscilační kotouče – modifikace

Sestava jednotlivých kotoučů, které jsou poháněny kruhovými řemeny je zobrazena na obrázek 65. Tyto jednotlivé oscilátory jsou vloženy do horní i spodní tryskové komory, do odvětrávacího otvoru, který je společný pro osm soustředných přívodních impaktních trysek. Všechny kotouče jsou poháněny transmisí z asynchronního motoru řízeného frekvenčním měničem.



Obrázek 65: Sestava jednotlivého oscilačního kotouče

Na následujícím obrázku (obrázek 66) je zobrazeno rozmístění a náhon všech oscilačních kotoučů v horní respektive spodní tryskové komoře. Z rozváděcí řemenice umístěné na hřídeli motoru jsou pomocí dvou řemenů naháněny spodní a horní oscilátory, řemeny jsou vedeny na velkou řemenici uprostřed komory.



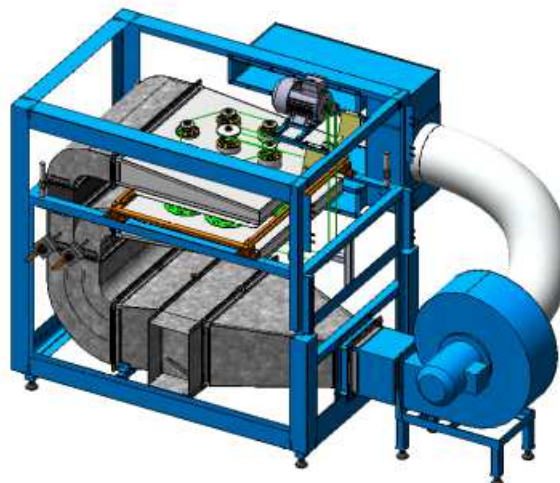
Obrázek 66: Rozmístění a náhon oscilačních kotoučů v komoře

Z tohoto centrálního rozvodu tryskové komory jsou následně poháněny ostatní oscilační kotouče. Všechny řemenice oscilačních kotoučů mají stejný průměr, aby byla požadovaná frekvence všech disků stejná. Použité rozváděcí řemeny mají průměr 6 mm.



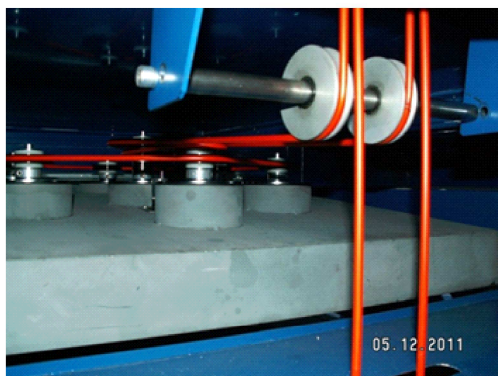
Obrázek 67: Pohled mezi tryskové komory osazené mechanickými oscilátory

Materiál řemenů dovoluje jejich použití do teploty 80 °C, krátkodobě až do 110 °C. Oscilační kotouče jsou uloženy v kluzných pouzdrech. Pro pohon oscilátorů je použit asynchronní motor 4AP80–8S, 600 ot·min⁻¹, 180 W, který je řízen frekvenčním měničem LENZE EVF8204–E. Pohon oscilátorů je autonomní a je oddělen od řízení samotné laboratorní sušárny. Konstrukce laboratorní sušárny zůstala téměř beze změn, pouze byly doplněny konzoly pro transmisi tak, aby bylo možné nahánět oscilátory ve spodní tryskové komoře. Kompletní experimentální zařízení je zobrazeno na obrázku 68.



Obrázek 68: Sušárna – vzduchotechnický okruh, tryskové komory vybaveny mechanickými oscilátory

Na obrázku je zobrazeno včlenění jednotlivých mechanických oscilátorů do komory K1 umístěné v experimentální impaktní sušárně. Dále je zde zobrazena transmise umožňující pohyb všech oscilátorů, která je poháněna samostatným motorem umístěným nad sušárnou. Na následujícím obrázku 69 je zobrazeno vedení kruhových řemenů k horním a spodním oscilátorům.



Obrázek 69: Pohon mechanických oscilátorů kruhovými řemeny v horní tryskové komoře

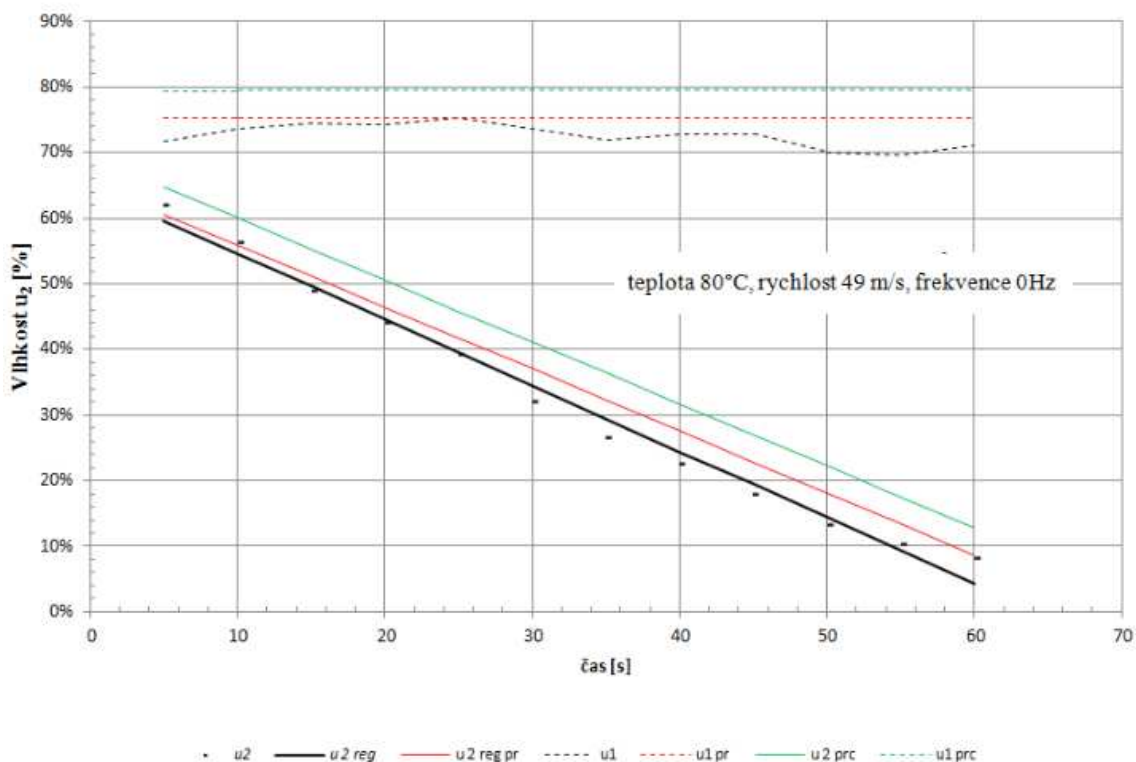
3.4.5.2 Stanovení rychlosti sušení oscilujícími proudy

Z předchozích měření, kdy byla horní komora vybavena jedním mechanickým oscilátorem, bylo zjištěno maximální zvýšení rychlosti sušení při frekvenci oscilací 10 Hz . Při tomto experimentu byly všechny ostatní trysky uzavřeny. Zabudováním mechanických oscilátorů do všech trysek v horní i spodní tryskové komoře mělo potvrdit zvýšení sušícího výkonu o desítky procent při frekvenci oscilací 10% a použití mechanických oscilátorů v celé ofukované ploše sušeného materiálu. Metodika měření zůstala stejná jako u použití jednoho mechanického oscilátoru.

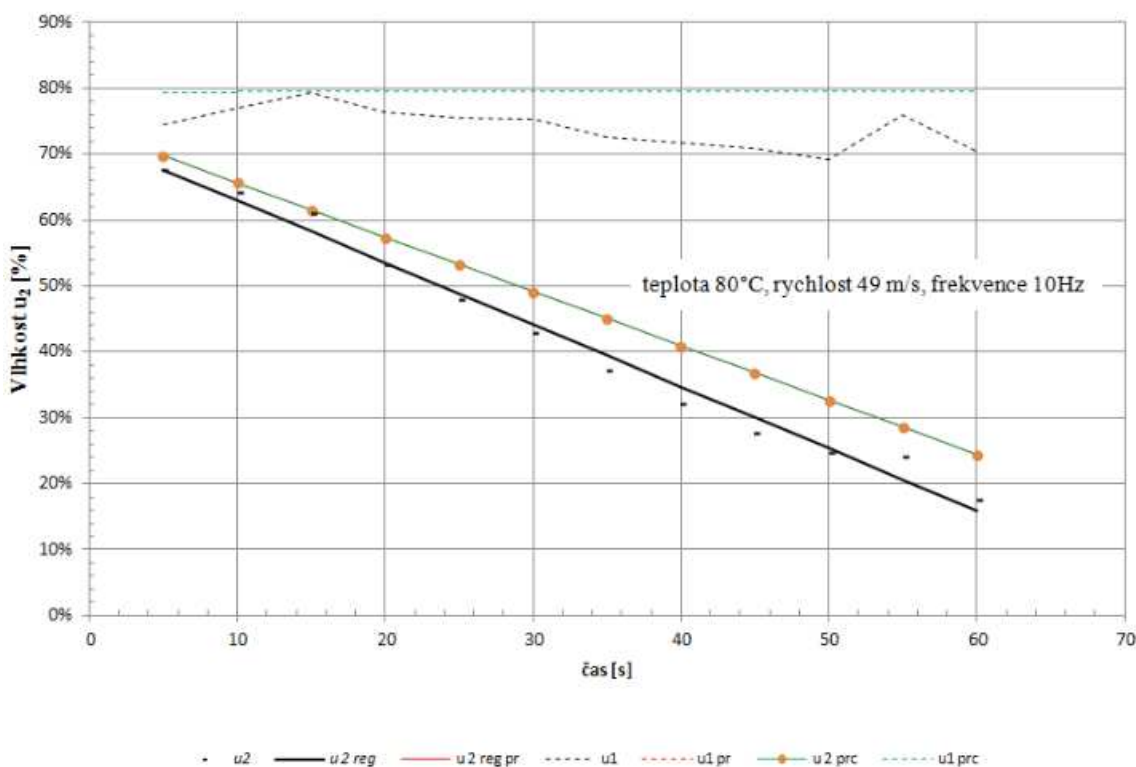
Při experimentu bylo zjištěno, že vlivem vysoké teploty uvnitř sušárny (80 °C) dochází k prodlužování kruhových řemenů a tím ke snížení tahu v řemenech. Rychlost pulsací byla tedy různá pro jednotlivé skupiny trysek v tryskové komoře. Ve spodní tryskové komoře byl tento jev významnější a to z důvodu sálavého tepla z kaloriferu umístěného pod spodní tryskovou komorou (obrázek 68). Spolehlivý převod byl pouze na dvou soustavách oscilátorů (oscilátor 1 a 2, obrázku 66). Proto bylo provedeno měření pouze pod a nad těmito oscilátory. Z toho důvodu byl zmenšen sušený vzorek ($S = 0,072\text{ m}^2$, $M_s = 25,01\text{ g}$) a na sítu byla vyznačena poloha vzorku při sušení pro jednodušší umístění. Ostatní trysky, geometricky mimo sušený materiál, byly provozovány bez pulsací.

Z důvodu fowládového odmačkávání prováděného v diskontinuálním režimu jsou výsledky přepočítány na maximální vstupní vlhkost u_1 podobně jako v předchozím

měření. Maximální naměřená vstupní vlhkost textilního vzorku byla 79,4 % a minimální 70,9 %.



Obrázek 70: Sušící křivka komory KIOS 1M – pro 0Hz oscilací, oscilátory v horní i spodní tryskové komoře (reprezentuje sušení bez oscilátorů)



Obrázek 71: Sušící křivka komory KIOS 1M – pro 10Hz oscilací, oscilátory v horní i spodní tryskové komoře

Pro porovnání sušících křivek (obrázek 70 a 71) a následně pak rychlostí sušení (tabulka 10), jsou jednotlivé sušící křivky korigovány na stejnou vstupní vlhkost textilního vzorku $u_1 = 79,4 \%$.

V grafech na obrázku 70 a 71 zobrazeno zelenou barvou. Červená barva odpovídá maximální vstupní vlhkosti daného měření. Na obrázku 71 červená a zelená přímka splývají. Měření probíhalo při nulové frekvenci pulsací (0 Hz), což reprezentuje takový stav, kdy tryskové komory nejsou vybaveny oscilátory. Na druhém grafu jsou zobrazeny výsledky měření, kdy je nastavena frekvence pulsací 10 Hz (obrázek 71), kdy podle předchozích měření měl být vliv pulsací nejvýznamnější.

Frekvence oscilací	Rychlost sušení			
	Os 1M		Os 1M - kor	
Hz	kg·m ⁻² ·hod ⁻¹	změna	kg·m ⁻² ·hod ⁻¹	změna
0	14,68	0,0%	14,83	0,0%
10	14,53	-1,0%	13,66	-8,6%

Tabulka 10: Absolutní rychlost sušení a procentuální změna oproti stacionárnímu proudění

Porovnáním rychlosti sušení bylo zjištěno (tabulka 10), že při nulové frekvenci pulsací je rychlost sušení vyšší než při frekvenci oscilací 10 Hz. Jedná se o sloupec Os 1M–kor, což jsou výsledky vztažené na maximální vstupní vlhkost. Výsledky bez této korekce jsou shodné. Výsledky měření na původních i zmenšených sušených vzorcích vykazovaly stejné tendence výsledků. Tedy v sušárně vybavené mechanickými oscilátory výše uvedené konstrukce nebylo prokázáno zvýšení rychlosti sušení při frekvenci pulsací 10 Hz.

3.4.6 Diskuse výsledků

Neprokázání zvýšení rychlosti sušení při použití mechanických oscilátorů, kdy tyto oscilátory byly provozovány na protilehlých tryskách ve spodní i horní tryskové komoře, má pravděpodobně následující příčiny.

- Odlišná vzdálenost od ústí trysky při ofukování pouze z jedné strany, kdy se sušený vzorek vlivem účinků pulsací impaktních proudů rozkmitává a tím se periodicky dostává blíže k ústí trysky. V této oblasti je jádro proudu ještě nerozbité a tudíž jsou zde součinitele přenosu tepla, respektive přenosu hmoty, výrazně vyšší.
- Konstrukce mechanického oscilátoru přerušuje proudění v poměru 1:1. Vlivem toho je pro vlastní sušení použito pouze poloviční množství sušícího média, kte-

ré je nositelem tepelné energie. Rovněž je sníženo množství nenasyceného vzduchu ve stejném poměru, které odvádí vlhkost z materiálu.

- Mechanický oscilátor byl použit jako náhrada fluidního oscilátoru prof. Tesaře, jelikož se tento oscilátor nepodařilo zprovoznit z důvodu enormních požadavků na tlakový vzduch. Z konstrukčního hlediska je použití kruhových řemenů pohánějící mechanický oscilátor nevhodné, protože vlivem tepelné roztažnosti dochází k poklesu tahu v řemenu a následnému prokluzování na teplotně exponovaných kladkách. Tento nedostatek je možné odstranit použitím ozubených řemenů, které zamezí prokluzu kladek vlivem tvarové vazby.

Použití mechanického oscilátoru na všech tryskách horní i spodní komoře neprokázalo zvýšení rychlosti sušení. Konstrukce mechanických oscilátorů je provedena tak, že celkové množství vzduchu dodávané ventilátorem není využito k sušení. Měření bylo zjištěno snížení rychlosti sušení při frekvenci oscilací impaktních proudů 10 Hz oproti nulové frekvenci oscilací o cca 8% . Při uvažování chyby měření minimálně $\pm 5\%$ je možné konstatovat, že pro dané konstrukční uspořádání mechanického oscilátoru dochází ke snížení rychlosti sušení v řádech jednotek procent.

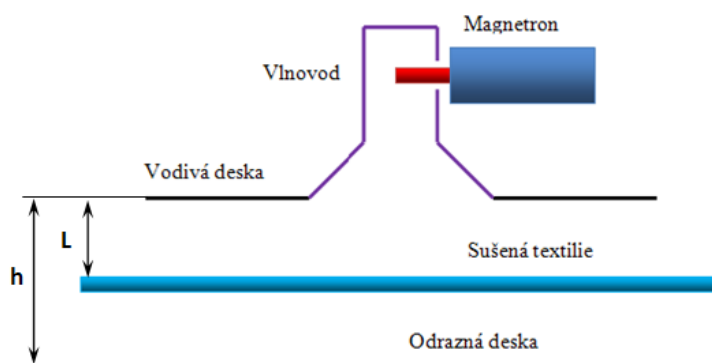
Z důvodů uvedených výše je zřejmé, že použití mechanického oscilátoru je nevhodné a nepovede ke zvyšování celkového sušicího výkonu při sušení plošných textilních materiálů, přestože v čase může lokálně docházet ke zvyšování přenosových součinitelů tepla a hmoty.

3.5 Impaktní dosušování v mikrovlnné sušárně [19]

Sušení mikrovlnným ohřevem má řadu výhod oproti jiným způsobům sušení. Výhodou mikrovlnného ohřevu je přímé působení na celý objem materiálu jako na ztrátové dielektrikum, kde se vysokofrekvenční energie absorbuje a mění v teplo. Eliminuje se tak problematika způsobená vedením tepla a hmoty, tak jak je typické u konvektivního sušení. U mikrovlnného ohřevu dochází k souhlasnému směru toku tepla a vlhkosti z materiálu (kapitola 2.2.2.2). Výhody jsou však vyváženy určitými omezeními. Jedná se jedná o tu vlastnost, která vyplývá z definičního vztahu absorbovaného výkonu, jenž je přímo úměrný sušenému objemu (rov. 81). V případě plošných textilií, kdy se jedná obecně o útvar s třetím rozměrem podstatně menším než ostatní dva, je absorpce mikrovlnné energie ztížena. Ve VÚTS a.s. byl vyvinut systém mikrovlnné sušárny, jenž pomocí odrazné desky v rezonanční komoře mikrovlnné sušárny zvyšuje účinnost sušení tím, že neabsorbovanou energii odráží zpět k sušené textilii (obrázek 72).

$$N = 0,0556 \cdot \varepsilon \cdot \tan \vartheta \cdot f \cdot E^2 \cdot V \quad (\text{rov } 81)$$

N	–	vysokofrekvenční výkon [kW]
$\tan \vartheta$	–	ztrátový činitel [-]
ε	–	dielektrická konstanta [$F \cdot m^{-1}$]
f	–	kmítočet [Hz]
E	–	intenzita elektrického pole [$V \cdot m^{-1}$]
V	–	objem ohřivaného materiálu [m^3]



Obrázek 72: Principiální uspořádání mikrovlnné části sušárny plošných textilií Impact Wave [7] s vyznačenými parametry pro optimalizaci procesu sušení

Účinnost celého zařízení je limitována účinností samotného magnetronu, která se pohybuje okolo 60 %. Emitováním elektronů vzniká na anodě ztrátové teplo, které se musí odvést, aby nedošlo k poškození magnetronu. Toto nízkopotenciální ztrátové teplo je možné využít k sušení konvektivním způsobem a tím zvýšit účinnost celého zařízení.

Tohoto přístupu je použito v mikrovlnné sušárně ImpactWave vyrobené ve VÚTS a.s. [20].

Pro impaktní část mikrovlnné sušárny byla použita modifikovaná trysková komora NK. Modifikace spočívala v náhradě systému odvodu nasyceného vzduchu. Odvod nasyceného vzduchu byl z ekonomických a provozních důvodů řešen dělením tryskové komory na více částí o šířce 400 mm, kdy nasycený vzduch je odváděn mezerami o šířce 50 mm mezi jednotlivými částmi. Usměrnění impaktních proudů bylo zachováno podle návrhu v kapitole 3.3.4. Trysková komora byla podle vzoru ADVAFIX konstruována tak, aby bylo možné provádět čištění jednotlivých trysek od případného textilního prachu a jiných nečistot běžně se vyskytujících v textilních provozech.

3.5.1 Sušárna ImpactWave

Na obrázku 73 je vyobrazena sušárna ImpactWave, která je vybavena dvěma sušicími obvody. V přední části sušárny je umístěn mikrovlnný rezonátor a za ním následuje impaktní část, využívající odpadní teplo z magnetronů umístěných v přední části.



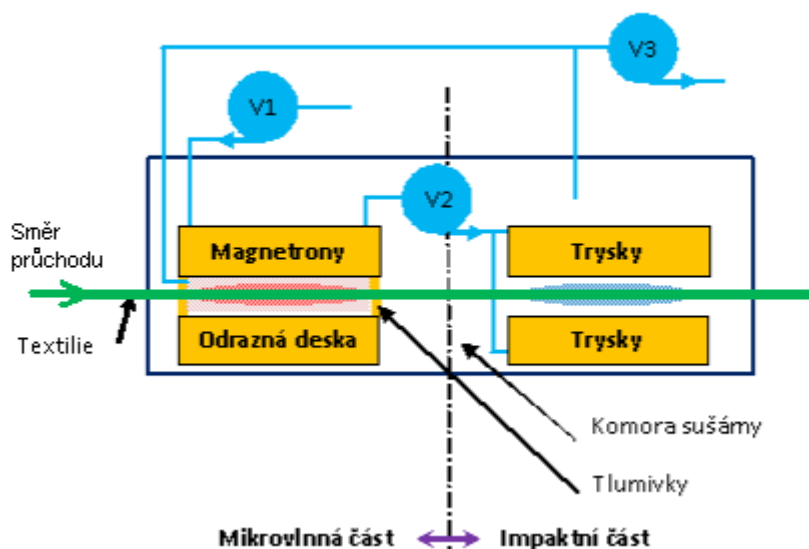
Obrázek 73: Mikrovlnná sušárna plošných textilií ImpactWave (vpravo nahoře – osazení mikrovlnné elektroniky, vpravo dole – impaktní část) [19]

Původní model mikrovlnné sušárny vykazoval poruchy způsobené parazitním vyzařováním mikrovlnné energie mimo oblast rezonátoru do sušicí komory, což vedlo k dílčím konstrukčním změnám. Důsledky parazitního vyzařování se projevily například na lokálním absorbování energie mimo rezonanční komoru v oblasti energetických řetězců.



Obrázek 74: Důsledky parazitního vyzařování [19]

Z důvodu omezení záření mimo rezonanční komoru bylo provedeno komplexní uzavření rezonátoru umožňující průchod sušené textilie a nastavování parametrů L a h (obrázek 72). Tímto bylo vyzařování z oblasti rezonátoru do komory sušárny minimalizováno, avšak došlo ke snížení sušicího výkonu z důvodu omezeného odvodu nasyceného vzduchu vodní parou z oblasti rezonátoru. Proto byl upraven vzduchotechnický okruh tak, aby nasycený vlhký vzduch z oblasti rezonátoru byl odsáván ventilátorem V3 (obrázek 75). Nucené odsávání z oblasti rezonátoru ventilátorem V3 pak následně vedlo ke zvýšení měrné odpařivosti pro dané uspořádání s uzavřenou rezonanční komorou. Porovnáním naměřených hodnot měrné odpařivosti původní otevřené koncepce a uzavřené koncepce s nuceným odvodem nasyceného vzduchu z rezonanční komory a omezeným parazitním vyzařováním bylo zjištěno zvýšení měrné odpařivosti oproti původní koncepci.



Obrázek 75: Principiální uspořádání sušárny ImpactWave [19]

3.5.2 Postup měření měrné odpařivosti

Odpařivost je měřena odlišným způsobem než v předcházejících měřeních. Důvodem je odlišné zavádění materiálu, kdy v případě mikrovlnné sušárny je použit teflonový pás, který je naháněn motorem řízeným frekvenčním měničem, kterým je možné

nastavit rychlost pohybu nosného pásu a tím dobu expozice měřených vzorků v elektromagnetickém poli. Pro stanovení měrné odpařivosti je použita hmotnostní metoda. Postup měření je následující:

1. Sušárna je zahřáta na provozní teplotu především impaktní část.
2. Vzorky pro zkoušky jsou rovnoměrně navlhčeny (odmáčkuty fulárdem)
3. Navlhčené vzorky jsou zváženy – M_{M1}
4. Vzorky jsou následně umístěny na pohybující se pás. Dále je změřen čas průchodu začátku a konce vzorku na určeném místě sušárny (vstup do sušárny) – τ_s
5. Po průchodu sušárnou jsou vzorky opět zváženy – M_{M2}

Odpařivost je stanovena pro jednotlivá měření podle rovnice 82.:

$$m_{vi} = \frac{M_{Mi1} - M_{Mi2}}{\tau_{si}} \quad (\text{rov } 82)$$

Kde index i odpovídá danému průchodu vzorku sušárnou. Hmotnostní úbytky, zjištěné pro jednotlivé stejné časové expozice sušených vzorků v sušárně, vykazovaly minimální odchylky v řádech několika miligramů. Z důvodu nebezpečí možného poškození sušárny vlivem parazitního vyzařování jsou pro danou dobu expozice výsledky průměrovány ze tří měření. Takže výsledná odpařivost je stanovena z rovnice 83 pro $n = 3$:

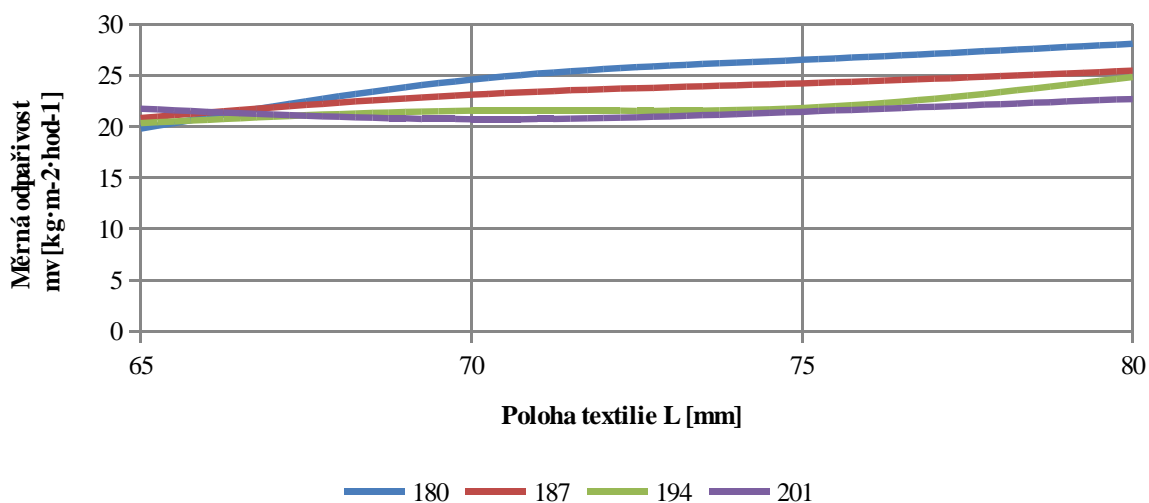
$$\bar{m}_v = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} m_{vi} \quad (\text{rov } 83)$$

Měření je provedeno pro různé hodnoty parametrů L a h (viz obrázek 72), kdy se hledala optimální poloha odrazné desky a poloha sušeného materiálu vzhledem k vodivé desce. Měření je provedeno s textilním materiálem Ba 100%, 422 g·m⁻². Jednotlivé polohy jsou nastavovány po krocích a to tak, že poloha odrazné desky je po krocích nastavena na hodnoty $h = (180; 187; 194; 201) \text{ mm}$. Pro každou polohu odrazné desky h je pak nastavena poloha sušeného materiálu po krocích $L = (65; 70; 75; 80; 85; 90) \text{ mm}$. Pro každou polohu s parametrem h, L je stanovena průměrná odpařivost ze tří průchodů textilního materiálu sušárnou podle rovnice 83. Toto měření prokazuje kvantitativní závislost odpařivosti m_v na nastavených parametrech h a L a dále pak stanovuje optimální polohu sušeného materiálu a odrazné desky pro daný materiál (Ba 100%, 422 g·m⁻²) vzhledem k vodivé desce.

Pro konstrukčně upravenou komoru je provedeno srovnávací měření ve stejných polohách rezonanční desky a sušeného materiálu jako pro původní uspořádání. Z výsledků, které budou uvedeny dále, vyplývá zvýšení sušicího výkonu oproti původnímu řešení. Zvýšení sušicího výkonu je na úkor minimalizace parazitního vyzařování mimo rezonanční komoru. Nežádoucí účinky minimalizovaného parazitního záření byly eliminovány takovou měrou, že se u laboratorních zkoušek již nevyskytly. Laboratorní zkoušky byly provozovány v diskontinuálním režimu, kdy sušárna byla v provozu cca 24 hodin. Délka nepřetržitého provozu se pohybovala okolo cca 2 hodin.

3.5.3 Vyhodnocení měrné odpařivosti sušárny ImpactWave

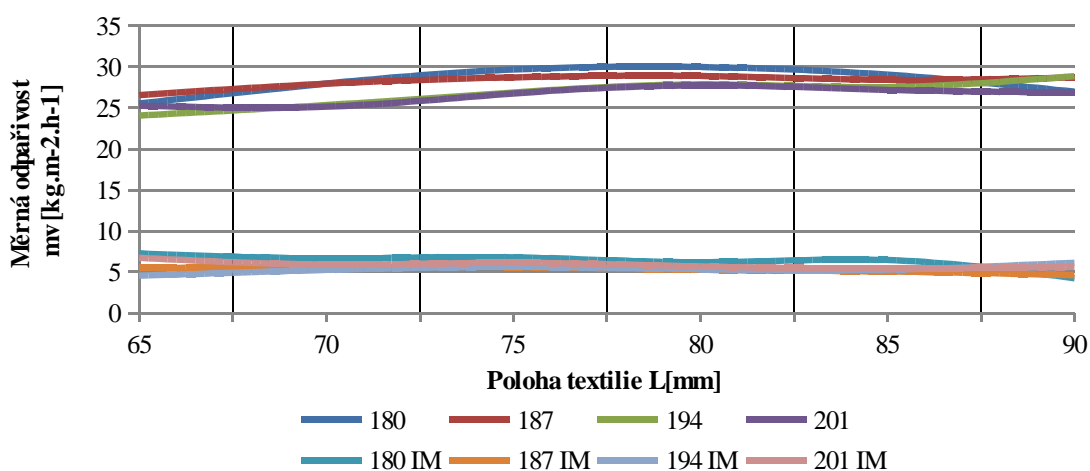
Měrná odpařivost měřená na původním modelu sušárny spojující mikrovlnnou sušárnu a impaktní sušárnu využívající odpadního nízkopotenciálního tepla je uvedena v grafu na obrázku 76. Měření bylo provedeno pouze do maximální hodnoty $h = 80$ [mm], a to z důvodu destruktivních účinků parazitního mikrovlnného záření, které se projevily mimo rezonanční komoru mikrovlnné části sušárny (obrázek 74). Nicméně je zde vidět, že měrná odpařivost narůstá a pro polohu $h = 80$ [mm] je pro všechny nastavení parametru L (vzdálenost odrazné desky) maximální.



Obrázek 76: Měrná odpařivost původní konstrukce sušárny Impact Wave

Právě z důvodu parazitního záření a jeho účinků projevujících se uvnitř v sušárně (obrázku 4), byla provedena změna konstrukce tlumivek na vstupu a výstupu textilie do rezonanční komory. Dále byl změněn vzduchotechnický okruh, který umožňuje odsávání vodních par z rezonanční komory. Měření bylo prokázáno zvýšení sušicího výkonu provedenými konstrukčními úpravami (graf na obrázku 77).

V grafu na obrázku 77 jsou uvedeny výsledky celkové měrné odpařivosti stanovené na zrekonstruované sušárně ImpactWave (křivky 180, 187, 194, 201) a dále pak křivky odpovídající měrné odpařivosti impaktní části sušárny (křivky 180 IM, 187 IM, 194 IM, 201 IM). Tyto křivky byly stanoveny tak, že byla sušárna provozována se zaslepenými tryskami v impaktní části, čímž byla stanovena měrná odpařivost pouze mikrovlnné části a tato byla odečtena od celkové měrné odpařivosti, která byla změřena při současném běhu mikrovlnné části a impaktní části. Rozdíl měrných odpařivostí pak odpovídá právě měrné odpařivosti impaktní části sušárny. Tento postup byl zvolen z důvodu, aby bylo možné sledovat sušící výkon ohřátého vzduchu odpadním teplem z ochlazovaných magnetronů, které jsou v činnosti.



Obrázek 77: Celková měrná odpařivost a měrná odpařivost v impaktní části sušárny ImpactWave

Celková průměrná měrná odpařivost sušárny s optimálně nastavenými parametry $L = 180$ [mm] a $h = 80$ [mm], je $m_v = 30$ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{hod}^{-1}$]. Průměrná hodnota měrné odpařivosti v impaktní části sušárny je $m_{vIM} = 5,2$ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{hod}^{-1}$]. Jak je zobrazeno v grafu na obrázku 77, tato hodnota odpovídá přibližně 15 % z celkové měrné odpařivosti mikrovlnné sušárny ImpactWave. Těchto 15 % sušícího výkonu je právě využito z energie odvedené z chladičů magnetronu, která by byla ve standardní mikrovlnné sušárně odvedena mimo sušárnu a dále nevyužita.

3.5.4 Diskuse výsledků

Měření na sušárně ImpactWave ukázalo, že spojením mikrovlnné části sušárny a impaktní části sušárny lze dosáhnout vyšší účinnosti sušení. Využitím ztrátového tepla vznikajícího na chladičích magnetronu se podařilo zvýšit sušící výkon o cca 15 %, což pro dané podmínky zkoušek je o 5 [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{hod}^{-1}$] odpařené vody z textilie více než při

sušení pouze mikrovlnným ohřevem bez zpětného využívání ztrátového tepla. Vhodným nastavením parametrů L a h lze vyladit celý mikrovlnný systém tak, že dosáhneme nej-
hospodárnějšího provozu. Rozdíl mezi optimálním nastavením systému, parametry $L = 180 [mm]$ a $h = 80 [mm]$ (graf na obrázku 77), a nevytuněného systému může činit až $5,5 [kg \cdot m^{-2} \cdot hod^{-1}]$ odpařené vlhkosti z materiálu, což odpovídá cca 23 % sušicího výkonu v mikrovlnné části pro daný zkoušený materiál.

Při laboratorních zkouškách byla prokázána eliminace poruch způsobených parazitním mikrovlnným zářením unikajících do prostoru sušárny z oblasti mikrovlnného rezonátoru a to vhodným konstrukčním uspořádáním tlumících prvků na rezonátoru. Vliv dlouhodobého působení minimalizovaného parazitního záření uvnitř sušicí komory by bylo vhodné odzkoušet v poloprovozním režimu, kdy se předpokládá dlouhodobé působení tohoto záření řádově v stovkách provozních hodin v diskontinuálním provozu.

Přednosti mikrovlnné sušárny ImpactWave jsou hlavně v možnosti téměř okamžitého náběhu na provozní vlastnosti (*mikrovlnný ohřev*), a zvýšená účinnost až o téměř 35 % oproti sušárně nevyužívající ztrátového tepla z chlazení magnetronu a ladění optimálních parametrů vzdálenosti odrazné desky a vzdálenosti textilie od vodivé desky.

4 Závěr

V úvodní teoretické části práce (kapitola 2.1 až 2.2) je uvedena podstata sušení, základní rozdělení sušení. Dále pak je uvedeno rozdělení sušení podle použitých technických prostředků využívajících různé fyzikální metody pro oddělení vlhkosti, především vody, ze sušeného materiálu. Z důvodu zaměření celé práce především na impaktní sušení, jsou dále v úvodní části (kapitola 2.3) uvedeny základní teoretické úvahy tohoto způsobu sušení. Je zde popsána podstata sušení a vliv vazby vody v materiálu na sušící křivku. Dále je v této teoretické části (kapitola 2.4) uvedena základní úvaha o hmotnostní a energetické bilanci impaktní sušárny a možnosti zobrazení sušícího pochodu v $h - x$ diagramu podle Molliera. Jsou zde dále uvedeny (kapitola 2.5) procesy související s přenosem tepla a hmoty a způsoby výpočtu parametrů sušárny dle kritériálních rovnic. Dále je v této teoretické části (kapitola 2.6) popsán vliv geometrie samotné trysky na zvýšení přenosových součinitelů. Z provedené rešerše vyplývá, že množství odpařené vody z materiálu je přímo úměrné rychlosti proudění a to přibližně v relaci $c^{0,8}$. Dále z teoretického rozboru vyplývá, že rychlost sušení je dána vazbou vody v materiálu, a že pro jednotlivé materiály je nutné provést experimentální stanovení sušící křivky pro určení odpovídající rychlosti sušení. Proto je také v této práci provedeno porovnání (kapitola 3.2) různých typů tryskových systémů porovnáním jejich sušících křivek na shodném materiálu při stejných podmínkách sušení. Pro tyto zkoušky byla navržena a vyrobena experimentální impaktní sušárna (kapitola 3.2). Z provedené rešerše současného stavu tryskových impaktních systémů vyplývá, že je kladen důraz na vhodné směšování přiváděných proudů do oblasti sušení s okolním plynem v sušící komoře a dále pak na odvod nasyceného plynu vlhkými parami z prostoru sušící komory. Podle těchto doporučení je konstruována nová trysková komora (kapitola 3.3), která je dále porovnána z hlediska sušícího výkonu se systémy z kapitoly 3.1. V samostatné kapitole (kapitola 3.4) je v této práci prověřováno využití oscilujících impaktních proudů při sušení plošných textilních materiálů. V závěru práce (kapitola 3.5) je ověřeno zvýšení sušícího výkonu mikrovlnné sušárny pomocí impaktního dosušování, kdy ohřev vzduchu pro impaktní část je realizován odpadním teplem z generátoru mikrovln. Jednotlivé práce probíhaly v rámci státního výzkumného úkolu řešeného v projektu TEXTIL II (kód projektu 1M0553), konkrétně v sekci A – Textilní strojírenství a mechatronika, projekt „Optimalizace a inovace vybraných uzlů textilních strojů s dopadem na textilní procesy“, kde jsem byl členem řešitelského týmu.

Návrh experimentální impaktní sušárny

Pro experimentální porovnání různých typů tryskových impaktních systémů a nového návrhu nové tryskové komory bylo nutné navrhnout a vyrobit experimentální impaktní sušárnu (kapitola 3.2). Sušárna je navržena s recirkulačním vzduchotechnickým okruhem, jehož součástí je radiální ventilátor. Vytápění je provedeno elektrickým kaloriferem umožňujícím ohřev vzduchu na teplotu $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplota je měřena teplotním senzorem PT100 a pomocí regulátoru je teplota nastavitelná v rozsahu $30\text{ až }80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ventilátor je poháněn asynchronním motorem, pro jehož regulaci otáček je použito frekvenčního měniče. Změnou otáček ventilátoru je potom možné regulovat výtokovou rychlost vzduchu z trysek pro dané tryskové komory (kapitola 3.1.1) v rozsahu $25\text{ až }50\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Sušárna byla navržena tak, aby byla možná jednoduchá výměna jednotlivých porovnávacích tryskových komor. Při měření rychlosti sušení se negativně projevila zdoluhavá výměna textilních vzorků, které byly dle zvyklostí vkládány do rámu do jehličkových článků. Tato výměna byla při měření realizována ručně, což si vyžádalo relativně dlouhou dobu výměny měřených vzorků. To následně vedlo ke zhoršení přesnosti měření. Proto byl navržen systém vkládání měřených vzorků mezi dvě síta, což zkrátilo výměnu jednotlivých měřených vzorků na minimum, přibližně na 4 s .

Na základě dostupných informací z veletrhů ITMA a prospektů jednotlivých výrobců, byl proveden návrh porovnávacích tryskových systémů využívajících různých konstrukčních uspořádání trysek (kapitola 3.1.1). V prvotní fázi všech čtyř návrhů bylo použito numerického modelování pro odladění finální geometrie jednotlivých návrhů. Numerické výsledky pak byly pro jednotlivé tryskové systémy porovnávány měřením. Hlavní důraz byl kladen na rovnoměrnost sušení v celé ploše sušeného materiálu a na měrnou odpařivost popřípadě sušicí rychlost. Rovnoměrnost sušení byla sledována pomocí termokamery (kapitola 3.2.3). Měrná odpařivost byla měřena hmotnostní metodou. Z těchto měření vyplynulo (kapitola 3.2.4), že kromě vhodného geometrického uspořádání trysek v komoře, který má zásadní vliv na rovnoměrnost, je nutné vhodným způsobem navrhnout a dimenzovat systém odsávání nasyceného vzduchu ze sušicí komory. I za předpokladu kolmo dopadajících impaktních proudů na sušenou textilií dochází z důvodu nedostatečného odvodu nasyceného vzduchu k odklonu těchto proudů od normály sušeného materiálu, což se projevuje na snížení rychlosti sušení. Právě tak předimenzováním odváděcích otvorů nasyceného vzduchu dochází ke snížení rychlosti sušení a to z důvodu zkrácení dráhy podélného proudění, což je možné sledovat například na testovací komoře 1.

Návrh nové komory NK

Dále je práce zaměřena na vývoj nové tryskové komory (kapitola 3.3). Z hlediska rovnoměrnosti sušení a sušicího výkonu byla základní geometrie konstrukčního návrhu nové tryskové komory provedena na základě analýzy soustavy kruhových trysek [5]. Tento základní konstrukční návrh byl rozšířen systémem odvodu nasyceného vzduchu. Jednotlivé konstrukční návrhy odsávacích otvorů byly testovány pomocí numerických simulací [16]. Z výsledků těchto simulací byla vybrána geometrie odsávacích otvorů ve variantě *C91* a geometrie trysek ve variantě *D*. Výsledky měření rovnoměrnosti výtokových rychlostí této komory (kapitola 3.3.7) prováděných Prandtlovou sondou dosahují odchylky $\pm 3 \%$, což je způsobeno vhodným umístěním odsávacích otvorů mimo hlavní proud vzduchu od ventilátoru k jednotlivým tryskám a vhodným spádem horního víka tryskové komory směrem od ventilátoru. Rychlost sušení, která je závislá jednak na použité tryskové komoře a rovněž tak na sušeném materiálu, je o $5 \div 20 \%$ vyšší oproti porovnávané tryskové komoře K3.

Tryskový systém vybavený pulsačním oscilátorem

V práci jsou uvedeny výsledky sušení pomocí oscilovaných impaktních proudů (kapitola 3.4). Počáteční měření vykazovalo možnosti výrazného zvýšení sušicího výkonu při použití mechanického oscilátoru a to v řádu desítek procent. Toto měření proběhlo v režimu ofukování textilních vzorků na malé ploše a pouze shora. Pro ověření zvýšení sušicího výkonu bylo provedeno osazení mechanických oscilátorů v celé ploše sušárny a to shora i zdola. Z konstrukčních důvodů, kdy teplota v sušárně nedovolovala pro daný materiál pohonných řemenů zajistit dostatečný tah, byla provedena úprava systému, kdy při sušení v celé ploše oscilovala $\frac{1}{4}$ trysek a v ostatních tryskách proudil sušící vzduch stacionárně. Ofukování probíhalo z obou stran a oscilované proudy proti sobě ve stejné fázi. Výsledky sušení v celé ploše nepotvrdily zvýšení sušicího výkonu použitím mechanických oscilátorů. Dokonce výsledky vykazovaly mírné snížení rychlosti sušení, avšak v hodnotách blížících se přesnosti stanovení rychlosti sušení. V případě sušení plošných textilních materiálů dochází vlivem účinků impaktních proudů k rozkmitávání sušené textilie, což je hlavní rozdíl oproti ofukování pevné desky. Toto rozkmitávání textilie vede k opakující se změně vzdálenosti od ústí trysky, čímž dochází lokálně k intenzivnějšímu přenosu tepla a rozrušování mezní vrstvy. To je pravděpodobně hlavní důvod, proč se celková rychlost sušení v daném experimentu nezvýšila. Nicméně i v případě kladných výsledků by bylo průmyslové použití mechanických oscilátorů pravděpodobně nereálné a to z důvodu vysokých nákladů na včlenění těchto prvků do stávajících tryskových systémů. V případě reálného použití by systém pulsační mu-

sel být proveden na základě fluidických oscilátorů. I zde je však pravděpodobné, že zvýšení výrobních nákladů na tryskovou komoru nebude pokryto zvýšením rychlosti sušení.

Impaktní dosušování v mikrovlnné sušárně

Pro použití nové tryskové komory NK v impaktní části byla provedena úprava z důvodu provozně technologických. Bylo potřeba zajistit možnost periodického čištění tryskových komor od textilního prachu a dalších nečistot. Proto byla trysková komora konstrukčně řešena bez odváděcích otvorů umístěných v komoře. Odvádění bylo řešeno rozdělením tryskové komory na tři části a odvod nasyceného vzduchu byl realizován mezerami mezi jednotlivými částmi. Systém usměrnění impaktních proudů zůstal nezměněn a byl řešen vložení torusu do kruhové trysky. V mikrovlnné sušárně ImpactWave je ohřev sušícího vzduchu řešen ochlazováním elektromagnetických generátorů (magnetronů), jenž je nutné pro spolehlivý chod mikrovlnné části. Při prvotních měření měrné odpařivosti docházelo k parazitnímu vyzařování energie mimo oblast rezonanční komory (kapitola 3.5), což vedlo ke změně krytování samotné rezonanční komory a následně i vzduchotechnického okruhu mikrovlnné sušárny. Měření prokázalo, že využití odpadního tepla tvořeného na chladičích magnetronu lze zvýšit měrnou odpařivost o přibližně 15 %. Dále pak proběhlo ladění celého systému s možností optimálního nastavení polohy odrazné desky a polohy sušeného materiálu. Bylo prokázáno, že správným nastavením odpovídajících parametrů lze zvýšit měrnou odpařivost v mikrovlnné části až o 23 %.

Další možný vývoj v oblasti tryskových systémů

Z provedených konstrukčních návrhů různých impaktních tryskových systémů a jejich měření z hlediska rychlosti sušení lze konstatovat, že již není příliš prostoru pro inovaci těchto klasických systémů. Z hlediska vývoje nových tryskových systémů je nutné použití CAE (Computer Aided Engineering) prostředků, protože tyto prostředky zahrnují jak simulace, ověřování a optimalizaci výrobků, tak optimalizaci jejich výroby. Přesto je nutné výsledky simulací ověřit měřeními a celý systém vyladit tak, aby se zohlednily všechny provozní požadavky, které v plné míře nelze nasimulovat.

I přes negativní výsledky při použití mechanických oscilátorů se z hlediska možného zvýšení sušících výkonů impaktních tryskových systémů jeví možnost použití oscilujících proudů. Avšak nutností je využití fluidických oscilátorů a to takových, které výrazně nenavýší náklady na výrobu takovýchto tryskových systémů.

Další cesta vedoucí ke snižování energetické náročnosti sušících zařízení je optimální nastavení systému, podobně jak bylo prokázáno při ladění optimální polohy odrazné desky a sušeného materiálu v rezonanční komoře sušárny MicroWave. Dále je možné hledat energetické úspory ve využívání odpadního tepla ze sušáren, ale s ohledem na možnost použití související s danou technologií, podobně jak je použita impaktní část v sušárně ImpactWave.

5 Seznam použité literatury

- [1]: Zvoníček, J.: *Sušení*, ČVUT Praha, 1982, Praha,
- [2]: Korger, M., Strádal, P., Ondrouch, V.: *Sušení a sušárny v textilním průmyslu*, Dům techniky ČSVTS, 1989, Ústí nad Labem, ISBN 8002998006
- [3]: Machaňová, D.: *Předúprava textilií I*, skriptum TU, 2005, Liberec, ISBN 80-7083-971-6
- [4]: Simon, J., Kvapil, M.: *Základy technologie zušlechťování textilií I*, VŠST, 1979, Liberec,
- [5]: Korger, M.: *Analýza soustav kruhových trysek určených pro napínací sušící rám s.p. Elitex - P56*, SVÚSS Běchovice, 1991, Praha, Technická zpráva č. SVÚSS 09-09124
- [6]: Vrba, J.: *Úvod do mikrovlnné techniky*, skripta ČVUT Praha, květen 2007
- [7]: Stejskal, M., Vrba, J., Klepl, R., Oppl, L.: *Microwave drier for fabrics*, European patent number EP1319914 A2 18-06-2003, 2003
- [8]: Prášil, M., Kvapil, M., Hofman, J.: *Stroje a mechanická technologie zušlechťování*, VŠST Liberec, 1985
- [9]: Mayer, J.: *Energetické úspory v průmyslu*, Energetický institut SEI Praha, 1990
- [10]: Šinták, J., Unger, J., Urbásek, J.: *Teoretické základy energetických zařízení II*, VŠST, 1988, Liberec, 55-819-88
- [11]: John H. Lienhard IV and John H. Lienhard V: *A Heat transfer textbook*, Cambridge, Massachusetts, U.S.A., 2008
- [12]: ARTOS UNI-STAR, 2008, <http://www.interspare.com>
- [13]: Fábera, J., Stejskal, M., Adámek, K.: *Application of thermovision to evaluating heating unevenness of fabric during drying and to comparing drying performances*, 13th International Conference Strutex, November 27-29, 2006, TU Liberec, ISBN 80-7372-135-X
- [14]: Termokamery Fluke Ti50 a Ti55 IR FlexCam® s technologií IR-Fusion®, 2009, <http://www.fluke.com/Fluke/czcs/Termokamery/Fluke-Ti50-Series.htm?PID=56188>
- [15]: Adámek, K., Žák, J.: *Sušící komory - Numerické modelování*, Interní zpráva VÚTS, 2006
- [16]: Adámek K., Kolář J.: *Sušící trysky*, interní zpráva VÚTS a.s., 2009, Liberec, PRO 549/2009
- [17]: Kolář J.: *Evaporation and impact flows in CFD*, EMC Liberec, 2009, Liberec, 80-7372-538-9
- [18]: Tesař, V.: *Fluidický oscilátor*, Ústav termomechaniky AVČR v.v.i., 2009, Praha, interní zpráva
- [19]: Fábera, J., Stejskal, M., Bomba, T., Stodola, P.: *Experimental setting the optimum position of a baffle plate and the position of a fabric in the impact wave dryer of textile*, 16th International Conference Strutex, 2009, TU Liberec, ISBN 80-7372-542-6
- [20]: Stejskal, M., Fábera, J., Stodola, P., Bomba, T.: *Mikrovlnná sušárna plošných útvarů, zejména textilií a papíru*, Přihláška patentu číslo 2009-755, 2009
- [21]: Vrba, J., Stejskal, M., Fábera, J., Pourová, M.: *Microwave dryer of textile*, 15th international conference Strutex, 2008, TU Liberec, ISBN 978-80-7372-418-4
- [22]: Pírková, L., Kopecký, V., Trávníček, Z.: *Experimental and numerical study of a controlled pulsating flow*, 15th International Conference Strutex, 2008, TU Liberec, ISBN 80-7372-418-4

[23]: Stejskal, M., Fábera, J., Stodola, P.: *Studium nových principů impaktního sušení a vývoj nových tryskových systémů sušárenských strojů*, Průběžná zpráva o realizaci projektu za rok 2010, 2010, Liberec , ISRN TUL – VCT2(TS)--10/10/CZ

[24]: Peszyński, K.: *Výzkum a vývoj fluidických členů řídicích soustav na příkladech řízené osově symetrické trysky*, ČVUT Praha, 2009

Výzkumné zprávy v projektu Centrum Textil II

- [A1] Stejskal, M., Adámek, K., Fábera, J.: Úvod do problematiky impaktního sušení. Průběžná zpráva o realizaci projektu za rok 2005, ISRN TUL – VCT2(TS)--05/10/CZ
- [A2] Stejskal, M., Vrba, J., Klepl, R.: Způsoby intenzifikace mikrovlnného sušení textilií . Průběžná zpráva o realizaci projektu za rok 2005, ISRN TUL – VCT2(TS)--05/10/CZ
- [A3] Stejskal, M., Fábera, J.: Studium nových principů impaktního sušení a vývoj nových tryskových systémů sušárenských strojů. Průběžná zpráva o realizaci projektu za rok 2006, ISRN TUL – VCT2(TS)--06/10/CZ
- [A4] Stejskal, M., Havlík, J., Klepl, R.: Způsoby intenzifikace mikrovlnného sušení textilií . Průběžná zpráva o realizaci projektu za rok 2006, ISRN TUL – VCT2(TS)--06/10/CZ
- [A5] Stejskal, M., Adámek, K., Fábera, J.: Studium nových principů impaktního sušení a vývoj nových tryskových systémů sušárenských strojů. Průběžná zpráva o realizaci projektu za rok 2007, ISRN TUL – VCT2(TS)--07/10/CZ
- [A6] Stejskal, M., Adámek, K., Havlík, J.: Uplatnění nových fyzikálních metod při náhradě impaktního sušení plošných textilií II. Průběžná zpráva o realizaci projektu za rok 2007, ISRN TUL – VCT2(TS)--07/10/CZ
- [A7] Stejskal, M., Adámek, K., Fábera, J.: Studium nových principů impaktního sušení a vývoj nových tryskových systémů sušárenských strojů. Průběžná zpráva o realizaci projektu za rok 2008, ISRN TUL – VCT2(TS)--08/10/CZ
- [A8] Stejskal, M., Fábera, J., Havlík, J.: Uplatnění nových fyzikálních metod při náhradě impaktního sušení plošných textilií II. Průběžná zpráva o realizaci projektu za rok 2008, ISRN TUL – VCT2(TS)--08/10/CZ
- [A9] Stejskal, M., Adámek, K., Fábera, J.: Studium nových principů impaktního sušení a vývoj nových tryskových systémů sušárenských strojů. Průběžná zpráva o realizaci projektu za rok 2009, ISRN TUL – VCT2(TS)--09/10/CZ
- [A10] Stejskal, M., Fábera, J., Havlík, J.: Uplatnění nových fyzikálních metod při náhradě impaktního sušení plošných textilií II. Průběžná zpráva o realizaci projektu za rok 2009, ISRN TUL – VCT2(TS)--09/10/CZ
- [A11] Stejskal, M., Fábera, J., Stodola, P.: Studium nových principů impaktního sušení a vývoj nových tryskových systémů sušárenských strojů. Průběžná zpráva o realizaci projektu za rok 2010, ISRN TUL – VCT2(TS)--10/10/CZ



- [A12] Stejskal, M., Adámek, K., Fábera, J.: Studium nových principů impaktního sušení a vývoj nových tryskových systémů sušárenských strojů. Průběžná zpráva o realizaci projektu za rok 2011, ISRN TUL – VCT2(TS)--11/10/CZ

Konference a publikace

- [1] Fábera, J., Stejskal, M., Adámek, K.: Application of thermovision to evaluating heating unevenness of fabric during drying and to comparing drying performances, 13th International Conference Strutex, TU Liberec, November 27-29, 2006, ISBN 80-7372-135-X
- [2] Vrba, J., Stejskal, M., Fábera, J., Pourová, M.: Microwave dryer of textile, 15th International Conference Strutex, TU Liberec, November, 2008, ISBN 80-7372-418-4
- [3] Fábera, J., Stejskal, M., Bomba, T., Stodola, P.: Experimental setting the optimum position of a baffle plate and the position of a fabric in the impact wave dryer of textile, 16th International Conference Strutex, TU Liberec, November, 2009, ISBN 80-7372-542-6
- [4] Klouček, V., Fábera, J., Prýl, S., Brožová, V.: Power flow distribution of an Anti-backlash designed transmission, 54th International Conference of Machine Design Departments, Liberec, 2013, ISBN 80-7372-986-8

Užitné vzory a prototypy

- [1] Stejskal, M., Havlík, J., Stodola, P., Klepl, R., Bomba, T., Fábera, J., Klouček, V., Kraus, J.: Zařízení pro výrobu a zkoušení palivového nebo vzduchového potrubí automobilu. Užitný vzor, č. přihlášky 2011-24998, č. zápisu 23183 (2011)
- [2] Stejskal, M., Fábera, J., Stodola, P., Havlík, J., Klouček, V., Klepl, R.: Prototyp zařízení pro kombinovanou výrobu a zkoušení palivového potrubí automobilů Volvo. Druh výsledku G/A-Prototyp, identifikační kód RIV/46709002 (2011)
- [3] Stejskal, M., Fábera, J., Stodola, P., Havlík, J., Klouček, V., Klepl, R.: Technologie pro montáž a kontrolu svazků palivových trubiček. Druh výsledku Z/A-Poloprovoz, identifikační kód RIV/46709002 (2010)
- [4] Stejskal, M., Fábera, J., Stodola, P., Bomba, T.: Mikrovlnná sušárna plošných útvarů, zejména textilií a papíru. Přihláška patentu číslo 2009-755 (2009)
- [5] Stejskal, M., Fábera, J., Havlík, J., Klepl, R.: Zařízení pro zanášení útku, zejména na zařízení k výrobě kladených textilií. Přihláška patentu číslo 2006-626 (2006)

6 Přehled užitych značek a označení

a	Rychlost sušení	$[\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}]$
a_s	Měrná odpařivost	$[\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}]$
B	Pracovní šíře sušárny	$[\text{m}]$
\mathbf{B}	Vektor indukce magnetického pole	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{A}^{-1}]$
c	Lineární rychlost sušícího plynu	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
c_0	Koncentrace na povrchu tělesa	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
c_1	Koncentrace na okraji mezní vrstvy	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
D	Difúzní konstanta	$[\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}]$
d	Průměr ústí trysky	$[\text{m}]$
\mathbf{D}	Vektor indukce elektrického pole	$[\text{C}\cdot\text{m}^{-2}]$
d	Průměru trysky	$[\text{mm}]$
d_E	Ekvivalentní průměr	$[\text{mm}]$
d_{opt}	Optimální průměr trysky	$[\text{mm}]$
\mathbf{E}	Vektor intenzity elektrického pole	$[\text{V}\cdot\text{m}^{-1}]$
E	Intenzita elektrického pole	$[\text{V}\cdot\text{m}^{-1}]$
F	Plocha jedné sekce	$[\text{m}^2]$
f	Součinitel volné plochy	$[-]$
f	Frekvence oscilací (pulsací)	$[\text{Hz}]$
f	Kmitočet	$[\text{Hz}]$
f_{opt}	Optimální součinitel volné plochy	$[-]$
f_t	Průtočný průřez jedné trysky	$[\text{m}^2]$
g_m	Plošná hmotnost textilie	$[\text{g}]$
\mathbf{H}	Vektor intenzity magnetického pole	$[\text{A}\cdot\text{m}^{-1}]$
h_1	Entalpie vlhkého vzduchu na vstupu do sušící komory sušárny	$[\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}]$
h_2	Entalpie vlhkého vzduchu na výstupu ze sušící komory sušárny	$[\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}]$
\dot{J}_0	Enthalpie	$[\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}]$
\dot{J}_2	Enthalpie vzduchu na výstupu ze sušárny	$[\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}]$
\mathbf{J}_v	Vektor hustoty vodivého proudu	$[\text{A}\cdot\text{m}^{-2}]$
L	Vzdálenost od počátku desky ve směru proudu vzduchu	$[\text{m}]$
L	Délkový rozměr	$[\text{mm}]$
Le	Lewisovo číslo	$[-]$
Le^{1-n}	Lewisův koeficient	$[-]$
m_1	Hmotnost vzorku před vložením do sušárny	$[\text{kg}]$
m_2	hmotnost vzorku po vyjmutí ze sušárny	$[\text{kg}]$
M_{M1}	hmotnost vlhkého vzorku před sušením	$[\text{kg}]$
M_{M2}	hmotnost vzorku po vyjmutí ze sušárny	$[\text{kg}]$
m_{sv}	Hmotnost suchého vzduchu	$[\text{kg}]$
m_v	Odpařivost	$[\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}]$
n	Otáčky $\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}$	$[\text{ot}\cdot\text{min}^{-1}]$
n	Počet trysek v řadě	$[-]$
N	Vysokofrekvenční výkon	$[\text{kW}]$
n_c	Počet kruhových trysek	$[-]$
n_f	Počet řad trysek v tryskové komoře	$[-]$
Nu	Nusseltovo kritérium	$[-]$
P_d	Dynamický tlak	$[\text{Pa}]$
P_p	Parciální tlak vodní páry ve směsi vzduch – pára	$[\text{Pa}]$
P_p''	Tlak vodní páry odpovídající varu při dané teplotě	$[\text{Pa}]$
P_{p0}	Parciální tlak vodní páry na povrchu sušené látky	$[\text{Pa}]$
P_{p1}	Parciální tlak vodní páry na okraji mezní vrstvy	$[\text{Pa}]$
$P_{pstř}$	Střední parciální tlak vodní páry	$[\text{Pa}]$



Pr	Prandltovo kritérium	[-]
$P_{st\ sif}$	Střední statický tlak	[Pa]
Q_0	Tepelný výkon k usušení textilie po odvodnění	[J]
q_c	Teplo potřebné k odpaření 1kg vody	[J·kg ⁻¹]
Q_{LI}	Teplo obsažené ve vzduchu po jeho ohřátí topným tělesem	[J]
Q_{I2}	Tepelná energie vzduchu na výstupu ze sušárny	[J]
Q_{LO}	Tepelná energie vzduchu na vstupu do sušárny	[J]
Q_{M1}	Tepelná energie sušené látky na vstupu do zařízení	[J]
Q_{M2}	Tepelná energie sušené látky na výstupu ze sušárny	[J]
$Q_{OHŘ}$	Teplo dodané topným tělesem sušárny	[J]
Q_{VEN}	Energie ventilátoru	[J]
Q_{ZT}	Ztráty	[J]
Re	Reynoldsovo kritérium	[-]
R_p	Plynová konstanta vodní páry	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
R_v	Plynová konstanta pro vzduch	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
S	Plocha vzorku	[m ²]
s	Šíře textilního pásu	[m]
S	Vzdálenost ústí trysek od sušeného materiálu	[mm]
s'	Tloušťka vrstvy	[m]
Sc	Schmidtovo číslo	[-]
Sh	Sherwoodovo kritérium	[-]
t	Čas	[s]
t_0	Teplota povrchu vlhkého tělesa (hladiny kapaliny)	[K]
t_1	Teplota proudícího plynu na okraji mezní vrstvy	[K]
t_1	Teploty vzduchu na počátku měřené dráhy	[K]
t_2	Teploty vzduchu na konci měřené dráhy	[K]
$\tan \nu$	Ztrátový činitel,	[-]
u_1	Vlhkost materiálu před vstupem do sušárny	[%]
u_2	Vlhkost materiálu po sušení	[%]
V	Objem	[m ³]
v_m	Rychlost pohybu textilie	[m·s ⁻¹]
w	Rychlost proudění	[m·s ⁻¹]
w_o	Rychlost proudění určená v ose ústí trysky	[m·s ⁻¹]
x_1	Měrný obsah vodní páry ve vzduchu na vstupu do sušící komory sušárny	[kg·kg ⁻¹]
x_2	Měrný obsah vodní páry ve vzduchu na výstupu ze sušící komory sušárny	[kg·kg ⁻¹]
α	Součinitel přenosu tepla	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
β	Součinitel přenosu hmoty	[m·hod ⁻¹]
γ	Specifická hmotnost	[kg·m ⁻³]
δ	Měrná elektrická vodivost prostředí (konduktivita)	[Ω ⁻¹ ·m ⁻¹]
$\Delta h'$	Změnu entalpie vlhkého vzduchu	[J·kg ⁻¹]
Δm_K	Hmotnost vody ve formě par z vysoušené látky	[kg]
ε	Dielektrická konstanta (permitivita prostředí)	[F·m ⁻¹]
ε	Permitivita prostředí	[F·m ⁻¹]
ε	Součinitele kontrakce	[-]
λ	tepelná vodivost tekutiny	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
λ_v	tepelná vodivost tekutiny	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
μ	Permeabilita prostředí	[H·m ⁻¹]
ν	Kinematická viskozita	[m ² ·s ⁻¹]
ρ	Hustota volného prostorového náboje	[C·m ⁻³]
ρ_f	Měrná hmotnost částic	[kg·m ⁻³]
σ	Směrodatná odchylka	[-]
σ	Výpar	[kg·m ⁻² ·h ⁻¹]
τ	Doba expozice vzorku v sušárně	[s]
ν_0	Teplota povrchu desky	[K]

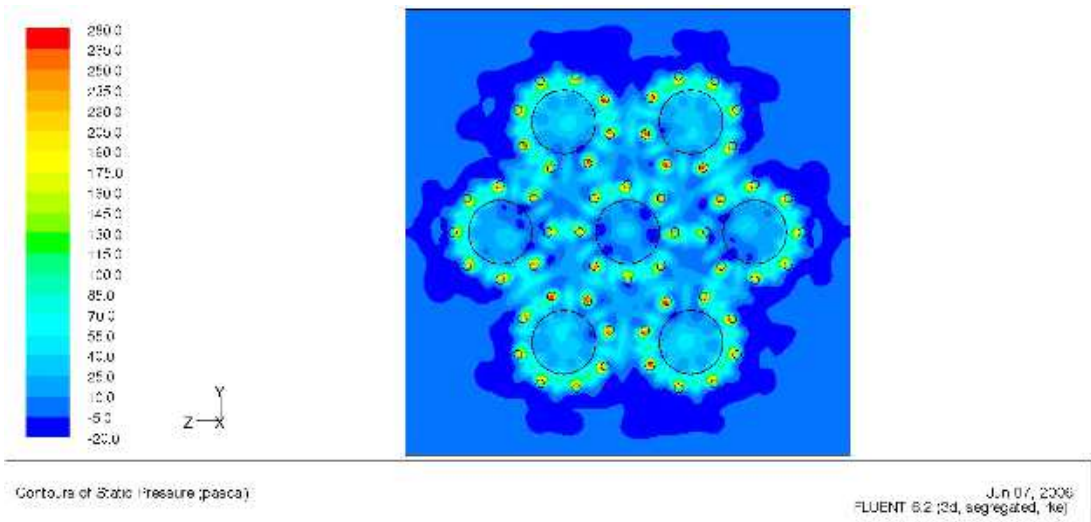
7 Seznam ilustrací

<i>Obrázek 1: Princip strojního odmačkávání (foulárd) [3].....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 2: Impaktní proud a jeho oblasti.....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 3: Proudění dvou sousedících impaktních proudů.....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 4: Tryskový systém pro impaktní sušení.....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 5: Princip mikrovlnné sušárny plošných textilií [7].....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 6: Sušicí křivka, rychlost sušení a teplota materiálu během sušení.....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 7: Základní schéma sušárny [10].....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 8: Průběh sušení v teoretické sušárně [10].....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 9: Obvody s recirkulací vzduchu [9].....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 10: Přenos tepla [1].....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 11: Přenos hmoty [1].....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 12: Přenos hmoty (větší změny teploty) [1].....</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 13: Obraz impaktního proudění [11].....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 14: Výtok z trysky – kontrakce proudu [11].....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 15: Umístění štěrbinových trysek ve stěně [5].....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 16: Kruhová tryska s prolisem [5].....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 17: Tryska s vnější a vnitřní směšovací oblastí [5].....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 18: Odvod vzduchu – Systém Star Jet [12].....</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 19: Komora 1 – systém centrálního odvodu vzduchu.....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 20: Komora 2 – systém vnitřní a vnější cirkulace.....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 21: Komora 3 – systém zajišťující kolmý proud.....</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 22: Komora 4 – čtvercové trysky s odvodem.....</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 23: Schéma experimentální impaktní sušárny.....</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 24: Experimentální impaktní sušárna – CAD model.....</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 25: Experimentální impaktní sušárna – skutečnost.....</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 26: Vzduchotechnický okruh experimentální sušárny.....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 27: Rám pro vkládání a vyndávání měřených vzorků ze sušárny.....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 28: Schéma měření Prandtlovou sondou.....</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 29: Rychlost proudu v závislosti na poloze potenciometru.....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 30: Výhodnocení výtokové rychlosti komory 1.....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 31: Termokamera Ti55 IR FlexCam s technologií IR–Fusion [14].....</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 32: Orientační teplotní stupnice výstupu termokamery.....</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 33: Komora 1 – porovnání teplotního pole s FEM výsledky.....</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 34: Komora 2 – porovnání teplotního pole s FEM výsledky.....</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 35: Komora 3 – porovnání teplotního pole s FEM výsledky.....</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 36: Komora 4 – porovnání teplotního pole s FEM výsledky.....</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 37: Měrná odpařivost komor K1, K2, K3 a K4; vzorek 1.....</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 38: Měrná odpařivost komor K1, K2, K3 a K4; vzorek 2.....</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 39: Porovnání měrné odpařivosti jednotlivých tryskových komor v čase 20, 40 a 120 s na vzorku 1 s měrnou odpařivostí získanou při okamžitém vážení a vážení po termovizních zkouškách.....</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 40: Porovnání měrné odpařivosti jednotlivých tryskových komor v čase 40 a 120 s vzorku 2 s měrnou odpařivostí získanou při okamžitém vážení a vážení po termovizních zkouškách.....</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 41: Varianta návrhu nové komory NK.....</i>	<i>70</i>
<i>Obrázek 42: Geometrie nové komory NK.....</i>	<i>71</i>
<i>Obrázek 43: Návrh ústí trysek typ D.....</i>	<i>71</i>
<i>Obrázek 44: Návrh ústí trysek typ E.....</i>	<i>72</i>
<i>Obrázek 45: Návrh ústí trysek typ F.....</i>	<i>72</i>
<i>Obrázek 46: Síť modelu varianty E po zjemnění a detail sítě v blízkosti stěny po zjemnění [16].....</i>	<i>72</i>

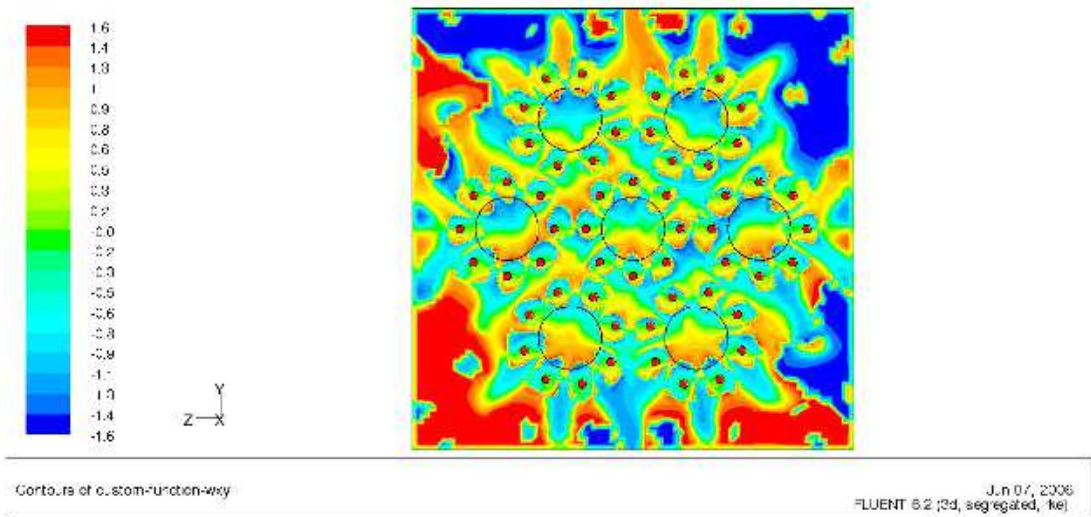
Obrázek 47: Půdorys zjemněné výpočtové sítě na dopadové ploše – varianty D1–E1–F1 [16].....	73
Obrázek 48: Numerická simulace proudění varianty D [16].....	74
Obrázek 49: Varianty odvodu vzduchu z tryskové komory C91 – C95 – C96.....	75
Obrázek 50: Trysková komora NK – horní a spodní pohled.....	76
Obrázek 51: Trysková komora NK – vnitřní uspořádání.....	77
Obrázek 52: Označení polohy trysek na tryskové komoře NK.....	78
Obrázek 53: Závislost otáček ventilátoru, dynamického tlaku a rychlosti vzduchu v ústí trysky na poloze regulačního potenciometru.....	79
Obrázek 54: Sušicí křivka vzorků 1 měřená na tryskové komoře NK.....	81
Obrázek 55: Sušicí křivka vzorků 2 měřená na tryskové komoře NK.....	81
Obrázek 56: Sušicí křivka vzorků 1 měřená na tryskové komoře K3.....	82
Obrázek 57: Sušicí křivka vzorků 2 měřená na tryskové komoře K3.....	82
Obrázek 58: Fluidický oscilátor prof. Ing. Václava Tesaře CSc. [18].....	84
Obrázek 59: Uspořádání fluidického oscilátoru se zesilovačem [18].....	85
Obrázek 60: Oscilační kotouče.....	85
Obrázek 61: Mechanický oscilátor řízený otáčkami motoru.....	86
Obrázek 62: Sušicí křivka komory K1 osazené oscilátorem OS1 pulsujícím frekvencí 0 Hz, sušený vzorek 2.....	88
Obrázek 63: Porovnání rychlosti sušení pro oscilátory OS1 a OS2.....	89
Obrázek 64: Oscilační kotouče – modifikace.....	91
Obrázek 65: Sestava jednotlivého oscilačního kotouče.....	91
Obrázek 66: Rozmístění a náhon oscilačních kotoučů v komoře.....	91
Obrázek 67: Pohled mezi tryskové komory osazené mechanickými oscilátory.....	92
Obrázek 68: Sušárna – vzduchotechnický okruh, tryskové komory vybaveny mechanickými oscilátory.....	92
Obrázek 69: Pohon mechanických oscilátorů kruhovými řemeny v horní tryskové komoře.....	93
Obrázek 70: Sušicí křivka komory KIOS 1M – pro 0Hz oscilací, oscilátory v horní i spodní tryskové komoře (reprezentuje sušení bez oscilátorů).....	94
Obrázek 71: Sušicí křivka komory KIOS 1M – pro 10Hz oscilací, oscilátory v horní i spodní tryskové komoře.....	94
Obrázek 72: Principiální uspořádání mikrovlnné části sušárny plošných textilií Impact Wave [7] s vyznačenými parametry pro optimalizaci procesu sušení.....	97
Obrázek 73: Mikrovlnná sušárna plošných textilií ImpactWave (vpravo nahoře – osazení mikrovlnné elektroniky, vpravo dole – impaktní část) [19].....	98
Obrázek 74: Důsledky parazitního vyzařování [19].....	99
Obrázek 75: Principiální uspořádání sušárny ImpactWave [19].....	99
Obrázek 76: Měrná odpařivost původní konstrukce sušárny Impact Wave.....	101
Obrázek 77: Celková měrná odpařivost a měrná odpařivost v impaktní části sušárny ImpactWave.....	102

8 Seznam příloh

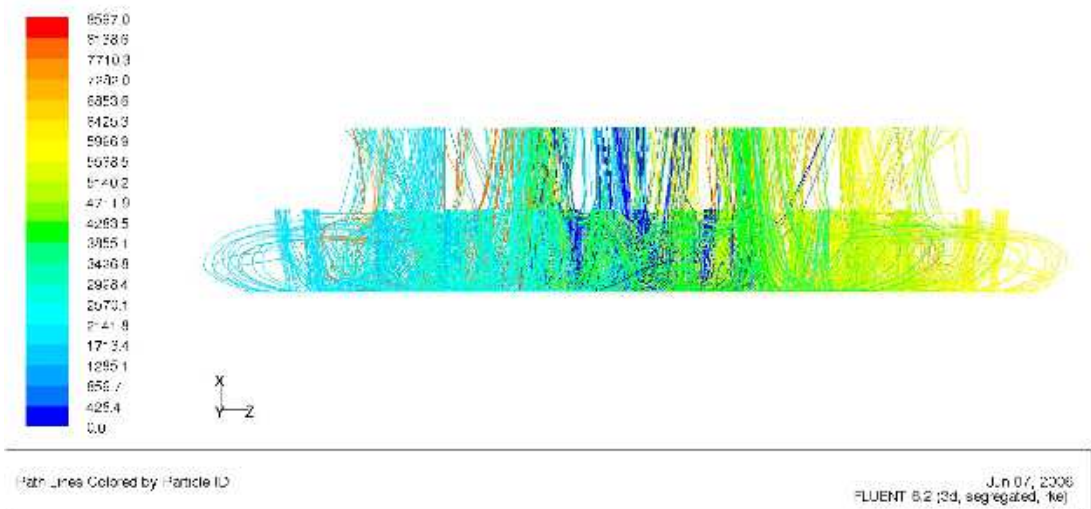
Příloha 1	Tryskové systémy komor K1, K2, K3 a K4 – Numerické simulace [15] a termovizní bitmapy pro dobu expozice 40 a 120 s.
Příloha 2	Oscilační kotouč oscilátoru 1 – nákres Oscilační kotouč oscilátoru 2 – nákres.
Příloha 3	Sušicí křivky – naměřené sušicí křivky stanovené při měření rychlosti sušení plošných textilních materiálů oscilovanými impaktními proudy generovanými mechanickým oscilátorem.



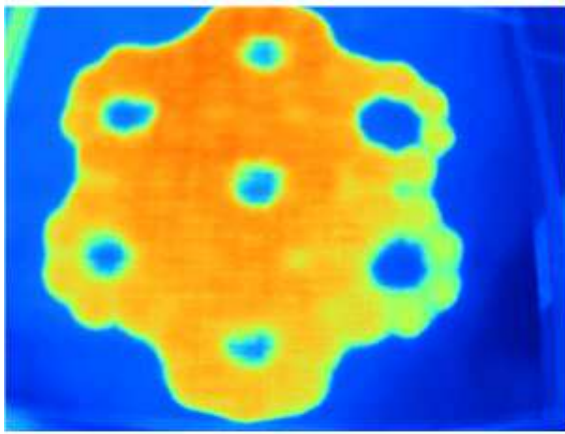
Komora 1 - tlakové pole na dopadové ploše



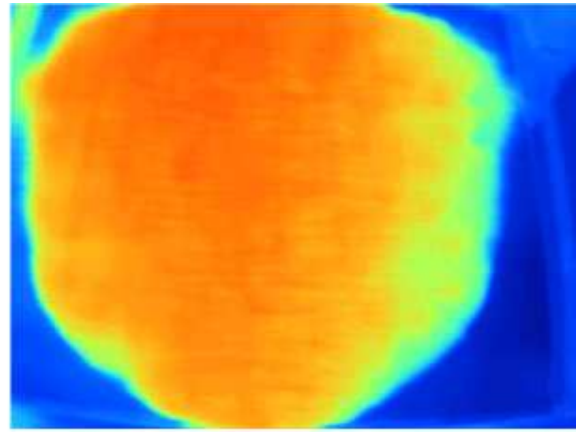
Komora 1 - rychlost nad dopadovou plochou



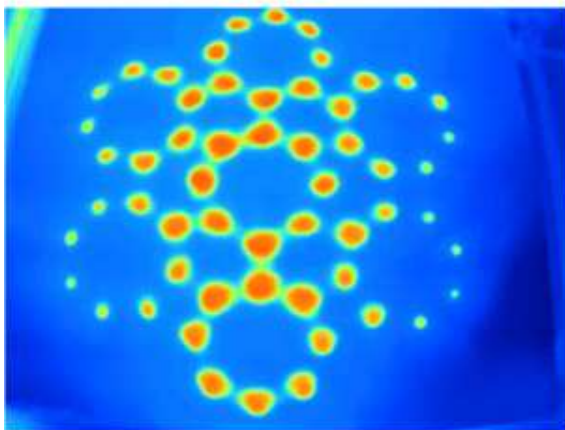
Komora 1 - proudnice rychlosti v rovině vedené osami střední sady trysek



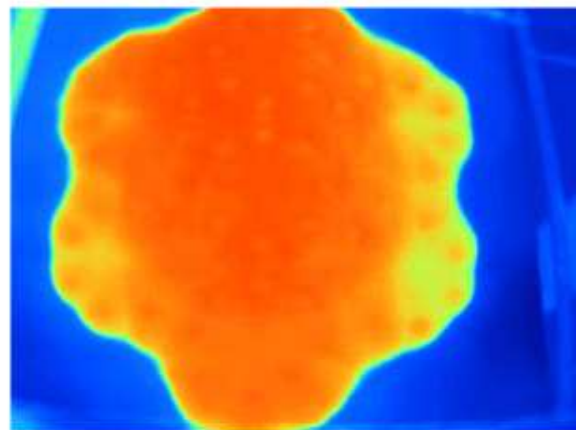
Komora 1 – 1/40



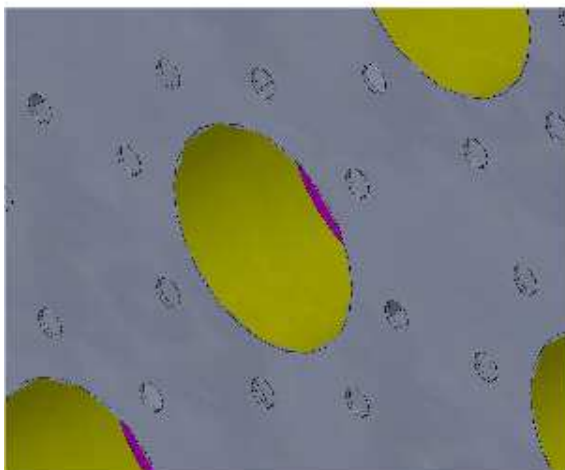
Komora 1 – 1/120



Komora 1 – 2/40



Komora 1 – 1/120



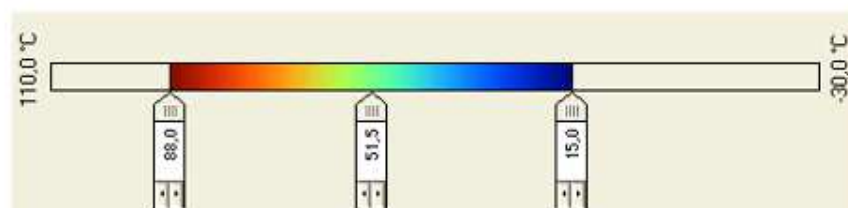
Počáteční vlhkost:

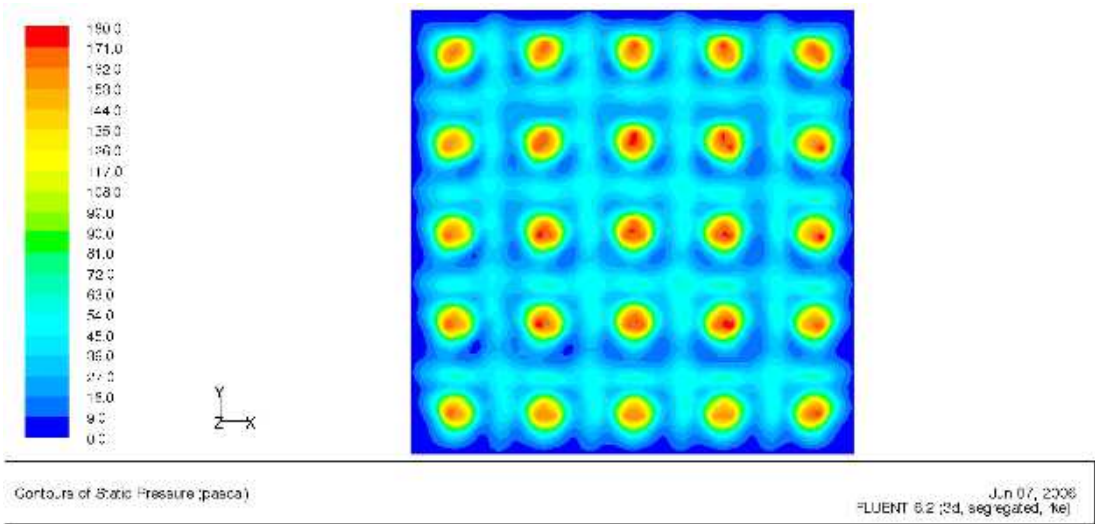
Vzorek 1 $u = 130 \%$

Vzorek 2 $u = 125 \%$

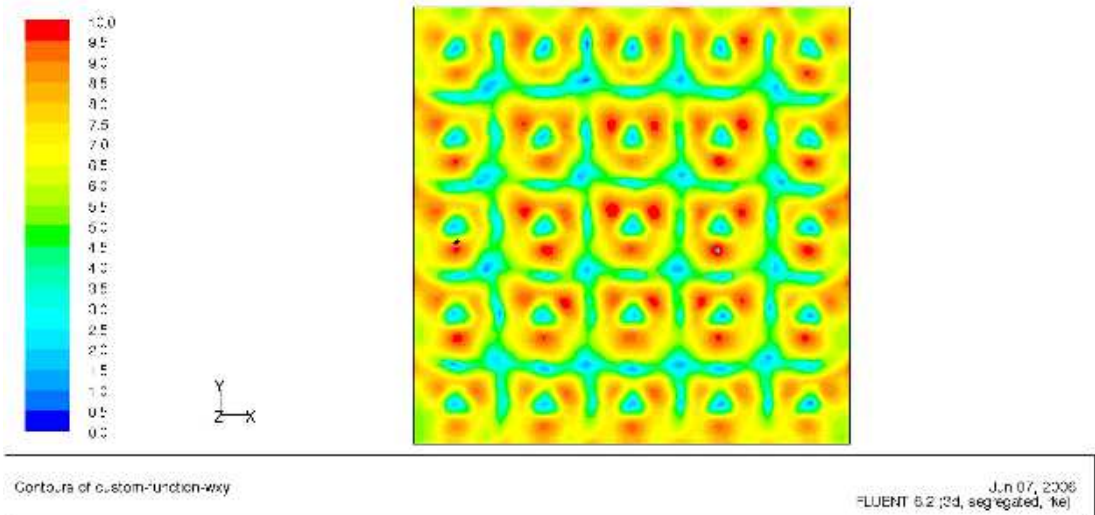
Vzorek 1 - Vlna-PES 45/55, 173 g m^{-2}

Vzorek 2 - Vlna-PES 45/55, 275 g m^{-2}

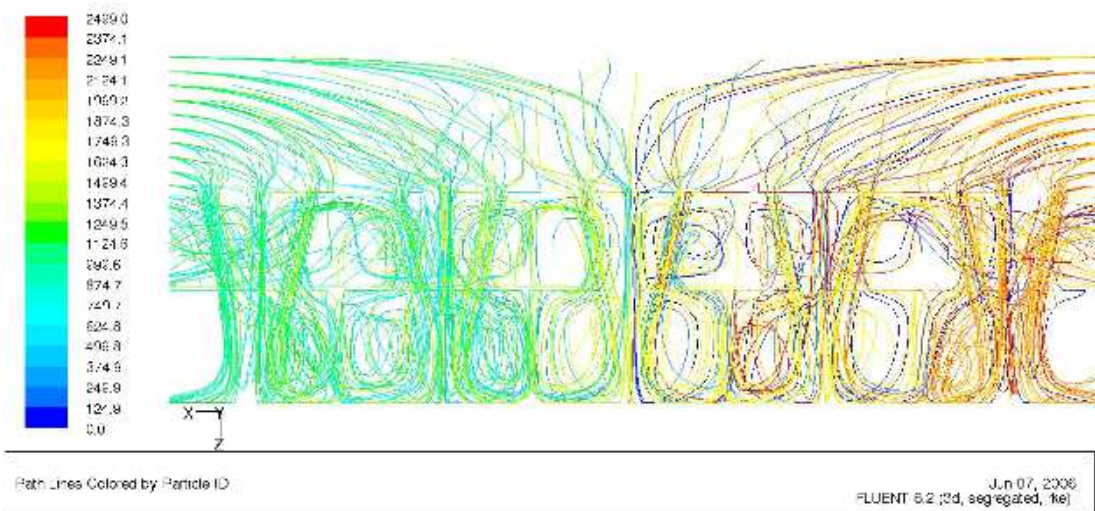




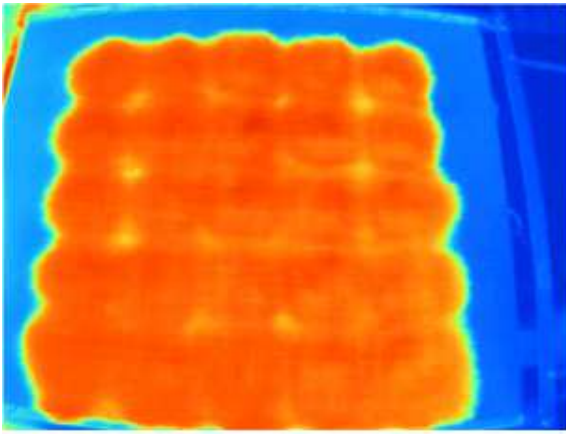
Komora 2 - tlakové pole na dopadové ploše



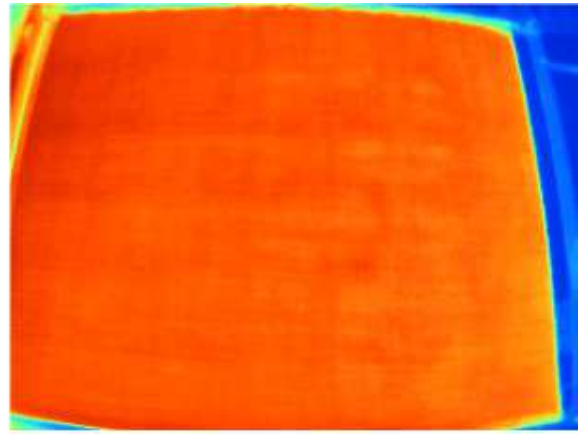
Komora 2 - rychlost nad dopadovou plochou



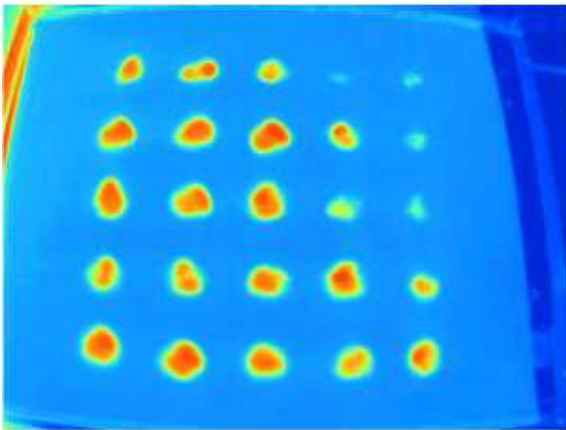
Komora 2 - proudnice rychlosti v rovině vedené osami střední sady trysek



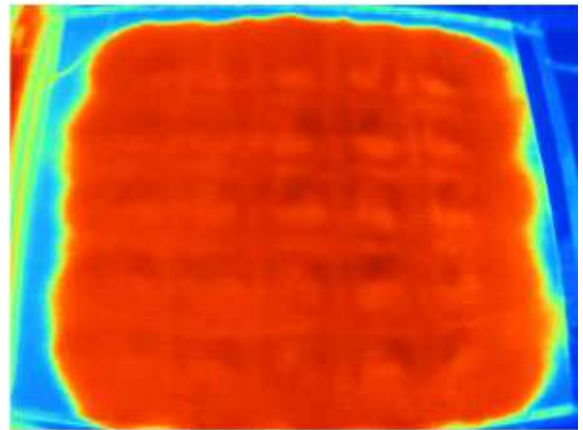
Komora 2 – 1/40



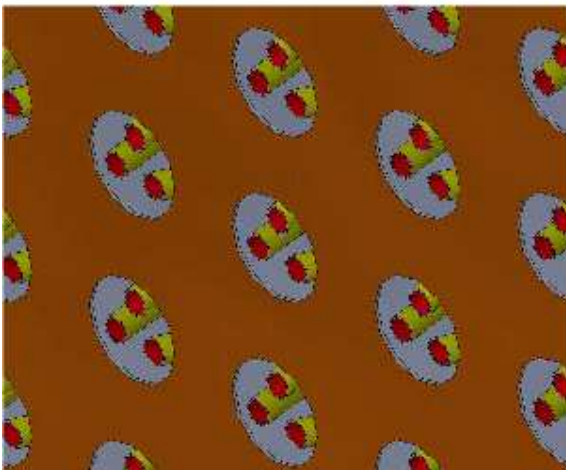
Komora 2 – 1/120



Komora 2 – 2/40



Komora 2 – 1/120



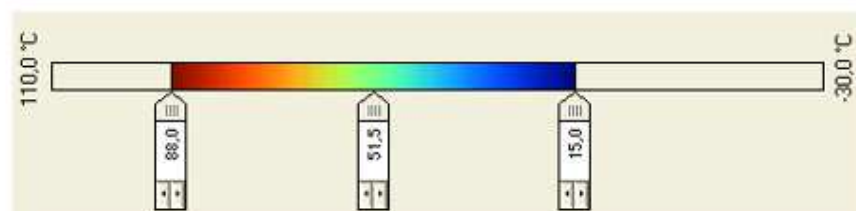
Počáteční vlhkost:

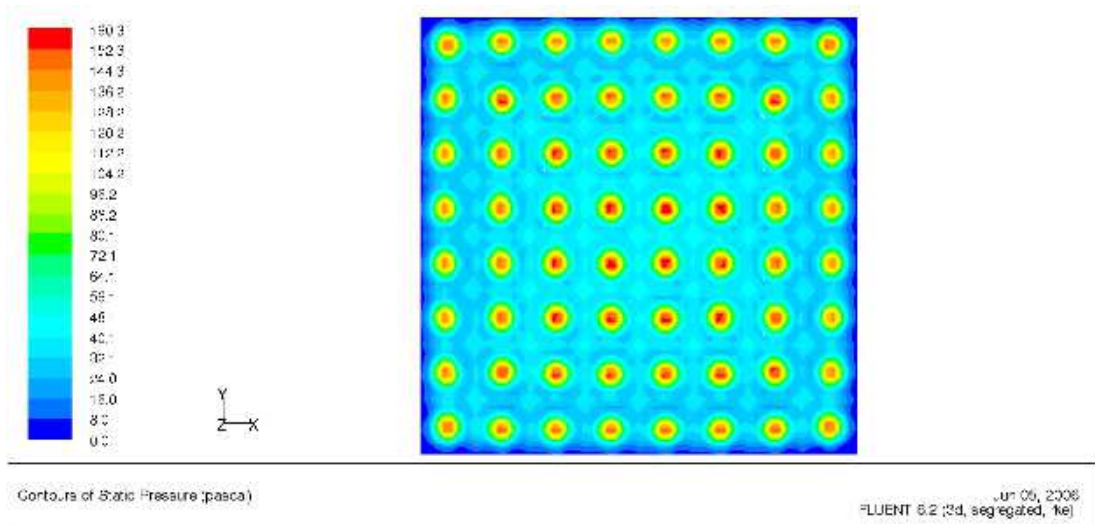
Vzorek 1 $\mu = 130 \%$

Vzorek 2 $\mu = 125 \%$

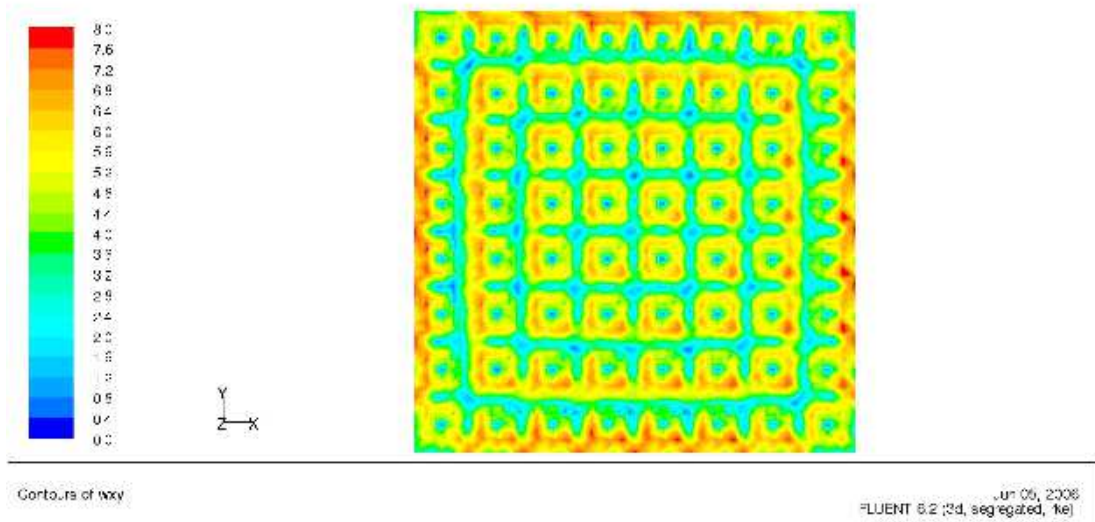
Vzorek 1 - Vlna-PES 45/55, $173 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$

Vzorek 2 - Vlna-PES 45/55, $275 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$

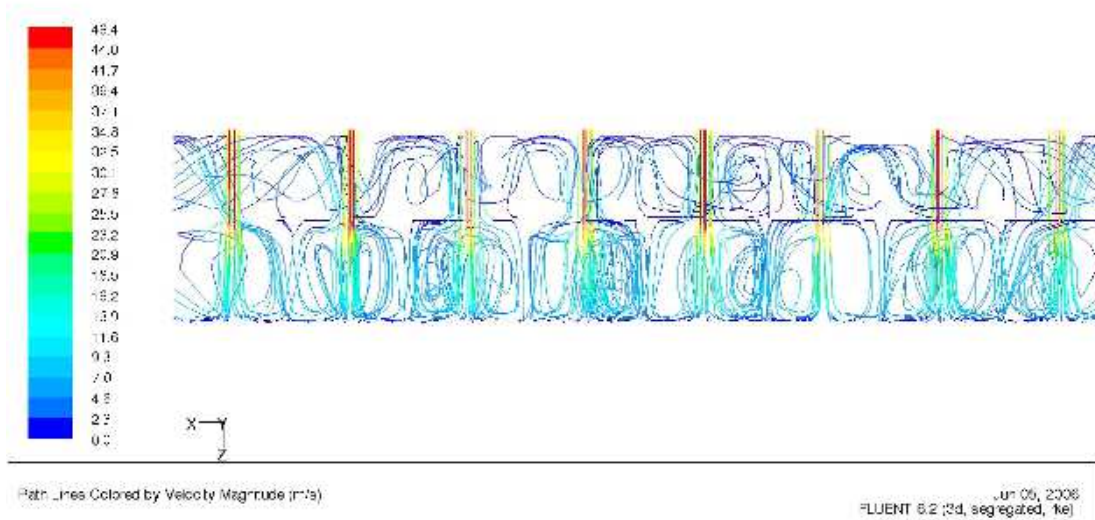




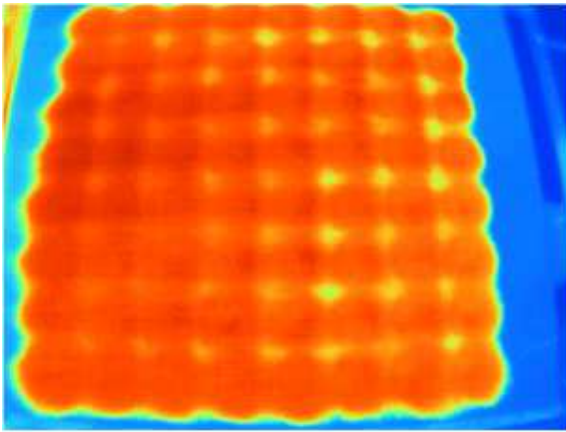
Komora 3 - tlakové pole na dopadové ploše



Komora 3 - rychlost nad dopadovou plochou



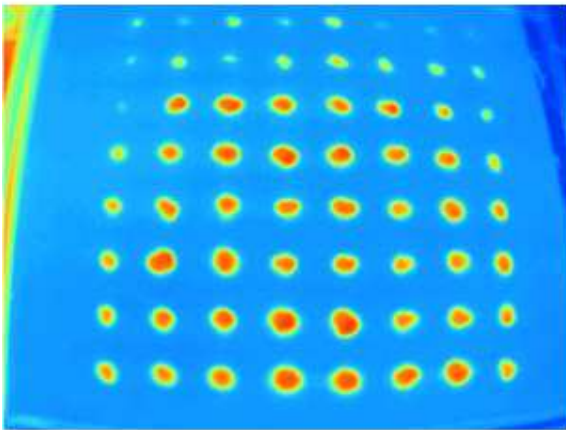
Komora 3 - proudnice rychlosti v rovině vedené osami střední sady trysek



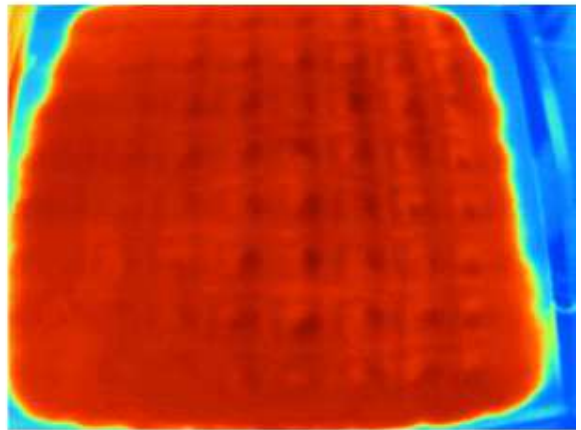
Komora 3 – 1/40



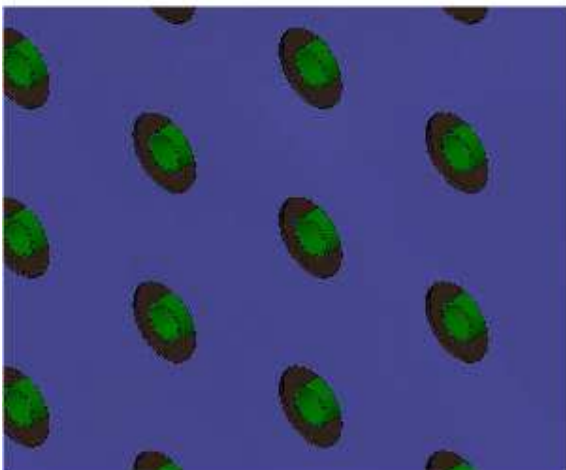
Komora 3 – 1/120



Komora 3 – 2/40



Komora 3 – 1/120



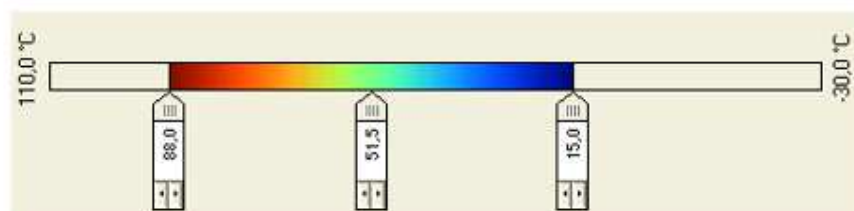
Počáteční vlhkost:

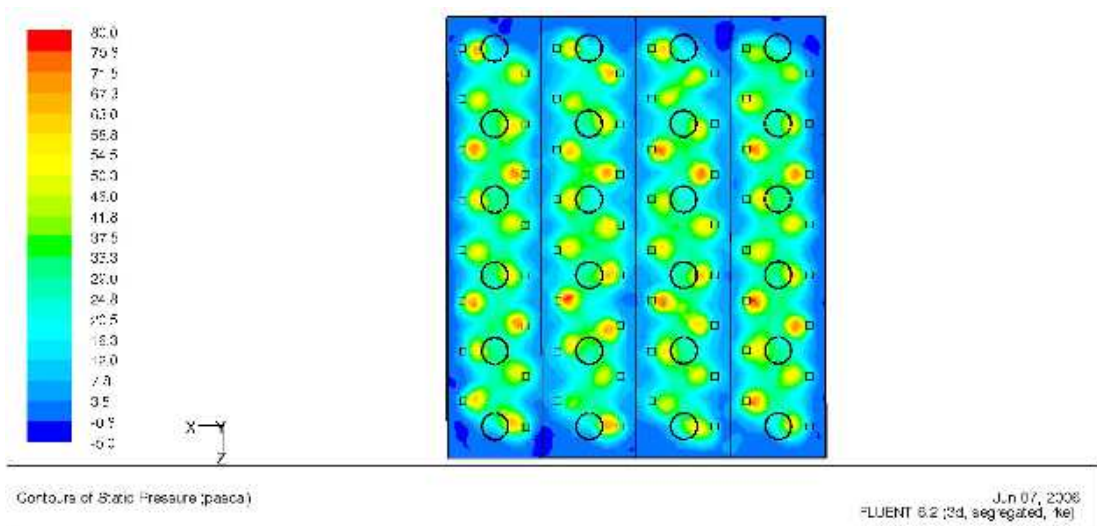
Vzorek 1 $\mu = 130 \%$

Vzorek 2 $\mu = 125 \%$

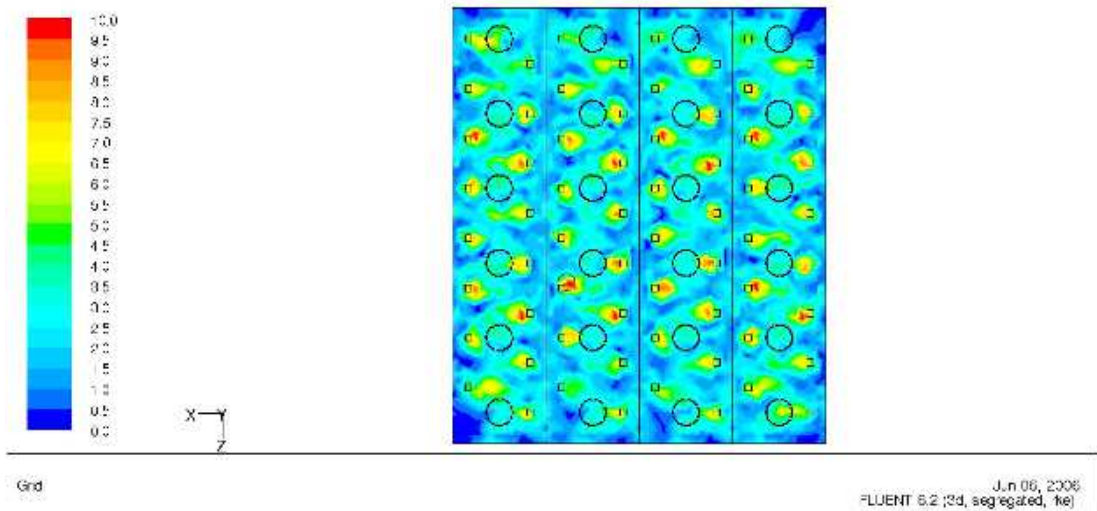
Vzorek 1 - Vlna-PES 45/55, 173 g m^{-2}

Vzorek 2 - Vlna-PES 45/55, 275 g m^{-2}

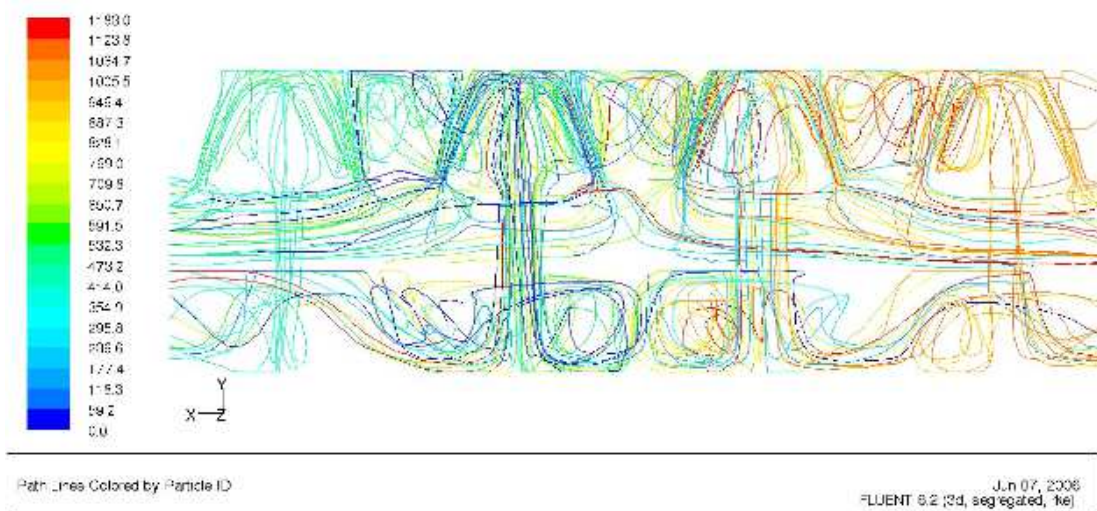




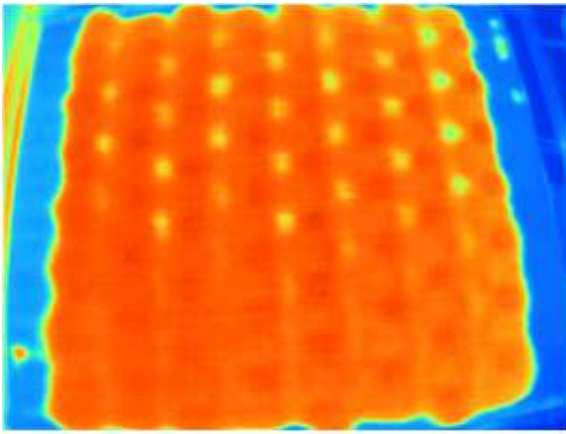
Komora 4 - tlakové pole na dopadové ploše



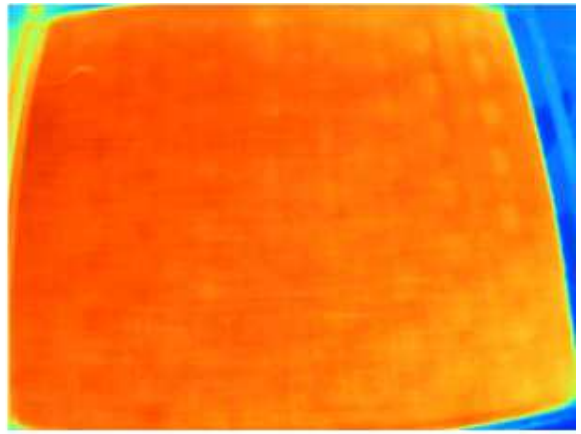
Komora 4 - rychlost nad dopadovou plochou



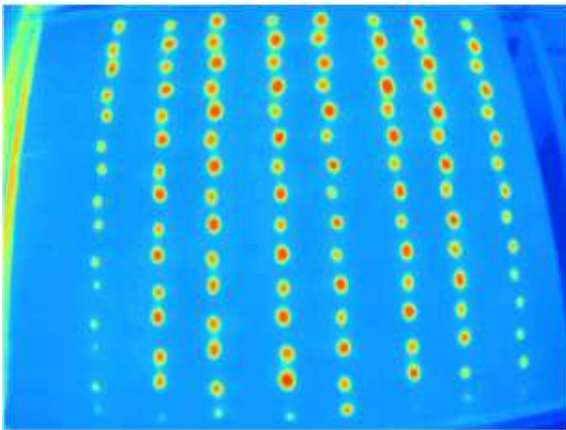
Komora 4 - proudnice rychlosti v rovině vedené osami střední sady trysek



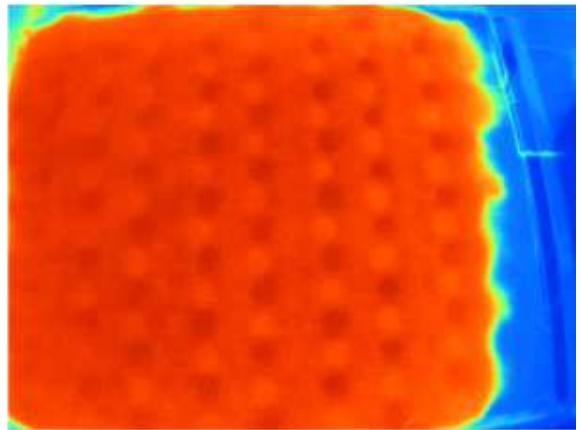
Komora 4 – 1/40



Komora 4 – 1/120



Komora 4 – 2/40



Komora 4 – 1/120



Počáteční vlhkost:

Vzorek 1 $\mu = 130 \%$

Vzorek 2 $\mu = 125 \%$

Vzorek 1 - Vlna-PES 45/55, 173 gm^{-2}

Vzorek 2 - Vlna-PES 45/55, 275 gm^{-2}

