



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

## ÚPRAVA CIRKULAČNÍHO OKRUHU INERTNÍ ATMOSFÉRY 3D TISKÁRNY SLM 280HL

MODIFICATION OF INERT ATMOSPHERE CIRCUIT OF 3D PRINTER SLM 280HL

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Somora

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

BRNO 2020



# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování  
Student: **Bc. Jakub Somora**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Konstrukční inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.**  
Akademický rok: 2019/20

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

## Úprava cirkulačního okruhu inertní atmosféry 3D tiskárny SLM 280HL

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kvalita kovových aditivně vyráběných dílů je v průběhu SLM procesu ovlivňována řadou procesních parametrů. Při výrobě dílů proudí nad pracovním prostorem inertní atmosféra, která zajišťuje odvod zplodin svařování z místa působení laseru. Nucená cirkulace zajišťuje, aby proudění atmosféry bylo laminární a rovnoměrné nad celým pracovním prostorem. Bohužel nejsou k dispozici žádné věrohodné informace o tom, jak velký vliv má proudění na relativní porozitu materiálu a zda je výkon cirkulačního systému dostatečný.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Výstup práce: aplikovaný výsledek (Fužit, Fprum, Gprot, Gfunk, R)

Projekt: MŠMT

**Cíle diplomové práce:**

Hlavním cílem je navrhnout a realizovat konstrukční úpravu recirkulačního systému ochranné atmosféry a zajistit tak efektivní odvod spalin ze stavební komory.

Dílčí cíle diplomové práce:

- analýza současného stavu,
- návrh možných variant úprav,
- konstrukce a simulace vybraného řešení,
- realizace úprav,
- experimentální ověření dosažených parametrů.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, fotografická dokumentace, digitální data.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske–studium–ukonceni/>

**Seznam doporučené literatury:**

FERRAR, B., L. MULLEN, E. JONES, R. STAMP a C. J. SUTCLIFFE. Gas flow effects on selective laser melting (SLM) manufacturing performance. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012, roč. 212, č. 2, s. 355–364. ISSN 09240136.

LADEWIG, A., G. SCHLICK, M. FISSER, V. SCHULZE a U. GLATZEL. Influence of the shielding gas flow on the removal of process byproducts in the selective laser melting process. *Additive Manufacturing*. 2016, roč. 10, s. 1–9. ISSN 22148604.

SCHNIEDENHARN, M., F. WIEDEMANN a J. H. SCHLEIFENBAUM. Visualization of the shielding gas flow in SLM machines by space-resolved thermal anemometry. *Rapid Prototyping Journal*. 2018, roč. 24, s. 1296–1304. ISSN 13552546.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá konštrukčnou úpravou cirkulačného okruhu inertnej atmosféry v 3D tlačiarni SLM 280HL. Cieľom navrhnutých úprav bolo zvýšiť efektivitu odvádzania kondenzátu a splodín a tým zvýšiť kvalitu výrobného procesu. Na základe experimentálneho merania rýchlostného poľa vo výške 12 mm bolo zistené, že v pôvodnej konfigurácii stavebnej komory sa vyskytujú lokality so zníženou rýchlosťou prúdenia. V daných lokalitách sa následne pomocou testu podarilo potvrdiť zvýšenú porozitu vzoriek. Následne bol za pomoci CFD simulácií navrhnutý spodný distribútor prúdenia, ktorý mal najmarkantnejší vplyv na porozitu. Ďalej bol navrhnutý prídavný výstup a deflektor prúdenia, ktorý mal za úlohu zefektívniť odvádzanie kondenzátu a splodín spod ochranného skla laseru. Navrhnuté komponenty boli vyrobené a prebehlo ich experimentálne overenie, ktoré dokázalo zrovnomenenie prúdenia a zníženie porozity na stavebnej platforme. Taktiež prebehol test s materiálom na báze horčička, ktorý dokázal efektívnejšie odvádzanie kondenzátu a splodín. V práci sa podarilo dokázať vplyv rýchlosti prúdenia na porozitu súčiastky pri rozdieloch v rýchlostiach prúdenia nad  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

## KLÚČOVÉ SLOVÁ

prúdenie inertnej atmosféry, distribútor prúdenia, vplyv prúdenia na porozitu, kondenzát

## ABSTRACT

The diploma thesis deals with the design modification of the circulation circuit of inert atmosphere in the 3D printer SLM 280HL. The aim of the proposed modifications was to increase the efficiency of condensate and flue gas removal and thus increase the quality of the production process. Based on experimental measurements of the velocity field at a height of 12 mm, it was found that in the original configuration of the build chamber, there are sites with reduced flow velocity. The test subsequently confirmed the increased porosity of the samples in the given localities. Subsequently, with the help of CFD simulations, a lower flow distributor was designed, which had the most significant effect on the porosity. Furthermore, an additional outlet and flow deflector were designed, which had the task of streamlining the drainage of condensate and fumes from under the protective glass of the laser. The designed components were manufactured and experimentally verified, which was able to prove the flow improvement and reduce the porosity on the platform. A test was also performed with a magnesium-based material, which proved more efficient removal of condensate and flue gases. The work managed to prove the influence of the flow velocity on the porosity of the component at differences in flow velocities above  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

## KEYWORDS

flow of inert atmosphere, distributor of flow, influence of flow on porosity, condensate



## BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

SOMORA, Jakub. Úprava cirkulačního okruhu inertní atmosféry 3D tiskárny SLM 280HL. Brno, 2020, 118 s. Dostupné taktiež z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124834>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedúci práce Daniel Koutný





## POĎAKOVANIE

Chcel by som poďakovať vedúcemu práce doc. Ing. Danielovi Koutnému, Ph.D. za odborné vedenie a cenné rady. Ďalej by som chcel poďakovať rodine a priateľom za podporu. A rovnaká vďaka patrí aj tým, ktorý mi pomohli pri práci či v priebehu celého štúdia.

## PREHLÁSENIE AUTORA O PÔVODNOSTI PRÁCE

Prehlasujem, že diplomovú prácu som vypracoval samostatne, pod vedením doc. Ing. Daniela Koutného, Ph.D. Súčasne prehlasujem, že všetky zdroje obrazových a textových informácií, z ktorých som čerpal, sú riadne citované v zozname použitých zdrojov.

.....

Podpis autora



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA</b>	<b>16</b>
2.1	Cirkulačný okruh inertnej atmosféry	17
2.2	Vznik vedľajších procesných produktov	20
2.2.1	Vznik rozstreknutých častíc	20
2.3	Vplyv rýchlosti inertnej atmosféry na akumuláciu vedľajších produktov	21
2.4	Vplyv prúdenia inertnej atmosféry na povrchové a objemové vady	23
2.5	Vplyv prúdenia inertnej atmosféry na pevnosť v ťahu	25
2.6	Vplyv prúdenia inertnej atmosféry na porozitu	26
2.7	Laminárne a Turbulentné prúdenie tekutiny	28
2.7.1	Vznik turbulencií	29
2.8	Experimentálne metódy vizualizácie prúdenia	30
2.8.1	Metóda termickej anemometrie	30
2.8.2	Metóda niťových sond	32
2.9	CFD simulácie	33
2.9.1	Modelovanie turbulencií	33
2.9.2	RANS modely turbulencií	34
2.9.3	Stenové funkcie	34
2.10	Porovnanie simulačných modelov a ich overenie	35
2.11	Konštrukčné riešenia úpravy geometrie vstupov a výstupov atmosféry	37
2.12	Distribúcia prúdenia	45
<b>3</b>	<b>ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE</b>	<b>47</b>
3.1	Analýza problému	47
3.2	Analýza a zhodnotenie rešerše	48
3.3	Podstata a ciele diplomovej práce	49
<b>4</b>	<b>KONCEPČNÉ RIEŠENIE</b>	<b>50</b>
4.1	Popis riešenia	50
4.2	Analýza prúdenia pôvodnej konfigurácie stavebnej komory	50
4.2.1	Experimentálne meranie rýchlosti prúdenia	51
4.2.2	CFD simulácie pôvodnej konfigurácie	53

4.2.3	CFD simulácia spodného vstupu	57
4.2.4	Vyhodnotenie experimentálneho merania a CFD simulácií	58
4.2.5	Test porozity	62
4.2.6	Korelácia porozity s rýchlosťou prúdenia	63
4.3	Spôsoby distribúcie inertnej atmosféry v stavebnej komore	64
4.4	Základné konštrukčné varianty	65
4.5	Koncepčné varianty spodného distribútora prúdenia	66
4.6	Koncepčné varianty prídavného výstupu	68
4.6.1	Návrh č. 1	68
4.6.2	Návrh č. 2	70
4.7	Výsledné riešenie a zhodnotenie	72
<b>5</b>	<b>KONŠTRUKČNÉ RIEŠENIE</b>	<b>73</b>
5.1	Návrh spodného distribútora prúdenia	73
5.1.1	CFD simulácie	74
5.1.2	Vyhodnotenie optimalizácie spodného distribútora	77
5.1.3	Dokončenie distribútora	80
5.2	Návrh vrchného deflektoru prúdenia	81
5.3	Návrh prídavného výstupu	83
5.3.1	CFD simulácia	83
5.4	Výroba navrhnutých úprav	85
5.5	Experimentálne overenie dosiahnutých parametrov	86
5.5.1	Meranie rýchlosti prúdenia	87
5.5.2	Korelácia porozity s rýchlosťou prúdenia	89
5.6	Modifikácia prídavného výstupu	90
5.7	Výroba navrhnutých komponentov	92
5.7.1	Výroba	92
5.7.2	Postprocesing	92
5.8	Experimentálne overenie parametrov dosiahnutých na súčiastkach vyrobených na SLM tlačiarni	93
5.8.1	Meranie rýchlosti prúdenia pôvodná pumpa	93
5.8.2	Test s výkonnejšou pumpou	95
5.8.3	Test odvádzania kondenzátu	96
<b>6</b>	<b>DISKUSIA</b>	<b>98</b>
<b>7</b>	<b>ZÁVER</b>	<b>101</b>

<b>8</b>	<b>ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV</b>	<b>102</b>
<b>9</b>	<b>ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN</b>	<b>105</b>
9.1	Použité skratky	105
9.2	Použité fyzikálne veličiny	105
<b>10</b>	<b>ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV</b>	<b>107</b>
<b>11</b>	<b>ZOZNAM TABULEK</b>	<b>113</b>
<b>12</b>	<b>ZOZNAM PRÍLOH</b>	<b>114</b>
12.1	Príloha A	115
12.2	Príloha B	115
12.3	Príloha C	116



# 1 ÚVOD

Aditívna výroba súčiastok pomocou technológie SLM má obrovský potenciál a nachádza svoje uplatnenie v rozličných druhoch priemyslu, či už sa jedná o odvetvie leteckého, automobilového alebo energetického priemyslu. Taktiež nájde svoje využitie v medicíne, kde sa používa v podobe chirurgických implantátov [1]. Výrobný proces je založený na princípe postupného nanášania vrstiev kovového prášku a jeho tavenia laserom. Výhoda tejto technológie spočíva v možnostiach integrovať niekoľko súčiastok do jedného dielu, čo umožňuje znižovanie hmotnosti prípadne stavbu topologicky optimalizovaných dielov. Proces aditívnej výroby súčiastok technológiou SLM je ovplyvňovaný celou radou procesných parametrov. Jeden z mnohých parametrov, ktoré vstupujú do procesu výroby je prúdenie inertnej atmosféry v stavebnej komore 3D tlačiarňi.

Požiadavky kladené na kvalitu aditívne vyrábaných dielov majú stúpajúcu tendenciu, a zároveň vyžadujú používanie širšieho spektra stavebných materiálov, ako napríklad horčikových zliatin, ktoré pri procese výroby produkujú zvýšené množstvo splodín. Prúdenie inertnej atmosféry má za úlohu zaručovať odvod splodín vznikajúcich tavením kovového prášku. Pri nedostatočnej rýchlosti prúdenia inertnej atmosféry alebo enormne turbulentnom prúdení môžu splodiny spôsobovať rozptyľovanie lasera. Čo môže mať za následok zníženie kvality vyrobenej súčiastky. Môže sa to taktiež odraziť na porozite dielu prípadne môže nastať proces delaminácie jednotlivých vrstiev nanášaného prášku [2].

Cieľom práce je navrhnuť konštrukčnú úpravu cirkulačného okruhu inertnej atmosféry tak, aby okruh zaručoval efektívny odvod splodín zo stavebnej komory. Konštrukčná úprava primárne spočíva v návrhu vstupu, prídavného výstupu a deflektoru prúdenia inertnej atmosféry na základe dát získaných z experimentálnych meraní a CFD simulácií. Po konštrukčných úpravách by malo byť možné používať širšie spektrum materiálov, ktoré vyžadujú efektívnejší odvod splodín vznikajúcich pri ich tavení.



Obr. 1-1 Stavebná komora a vizualizácia prúdenia v jej objeme [3].

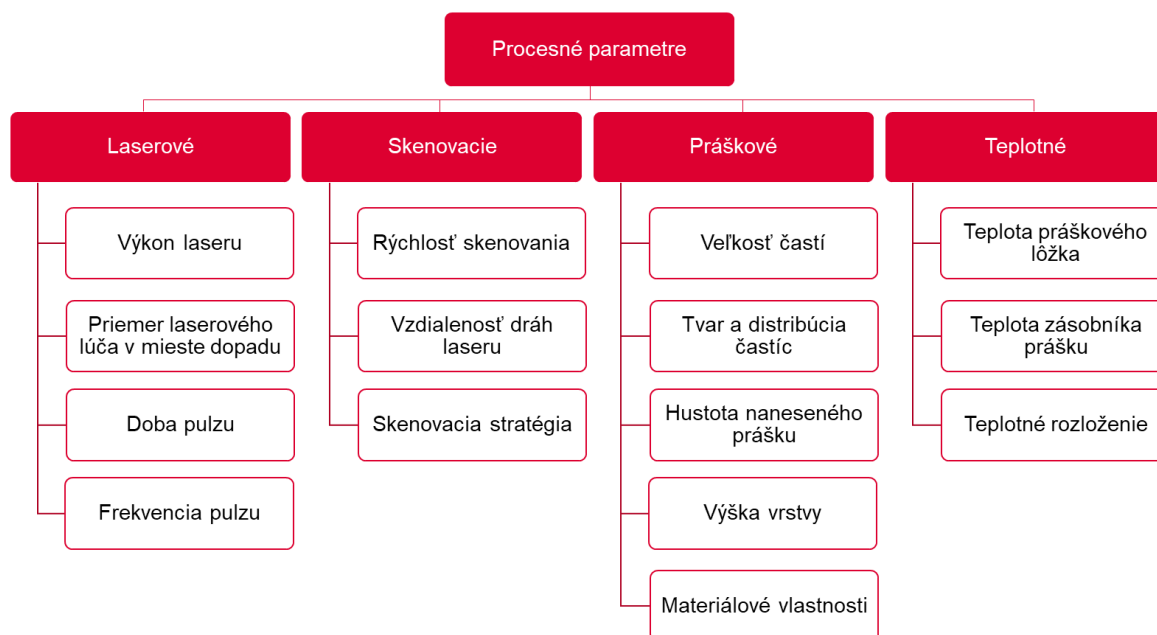
## 2 PREHL'AD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

Kvalita kovových dielov vyrábaných procesom SLM je ovplyvňovaná mnohými procesnými parametrami. Do procesu výroby vstupuje viac ako 130 parametrov s niekoľkými parametrami, ktoré majú zásadný vplyv na výslednú kvalitu súčiastky [4]. Medzi najdôležitejšie parametre patrí výkon laseru, skenovacia rýchlosť, vzdialenosť jednotlivých stôp a výška vrstvy, ktorá sa taví [5]. Všetky tieto parametre ovplyvňujú objemovú hustotu energie privádzanú do miesta tavenia materiálu definovanú vzťahom [5]:

$$E = \frac{P}{v_s \cdot h_d \cdot t_l} \quad (1)$$

kde  $E$  je objemová hustota energie v  $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $P$  je výkon laseru v  $\text{W}$ ,  $v_s$  je skenovacia rýchlosť v  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $h_d$  je šrafovací vzdialenosť v  $\text{m}$ ,  $t_l$  je výška vrstvy v  $\text{m}$ .

Aboulkhair [6] rozdelil konvenčne uvažované procesné parametre do štyroch základných skupín, a to do parametrov spojených s laserom, skenovaním, práškom a teplotou (Obr. 2-1).



Obr. 2-1 Procesné parametre SLM [6].

Okrem toho sa predpokladá, že charakter prúdenia inertnej atmosféry v stavebnej komore má rovnako významný vplyv na kvalitu a reprodukovateľnosť komponentov naprieč celým stavebným priestorom [4]. Na kvalitu súčiastky majú rozhodujúci vplyv dva faktory a to rozptýlenie laserového lúča od vedľajších produktov nachádzajúcich sa v jeho dráhe a akumulácia nežiadúcich vedľajších produktov na práškovom lôžku [2]. Obidva faktory sú ovplyvňované prúdením inertnej atmosféry v stavebnej komore.



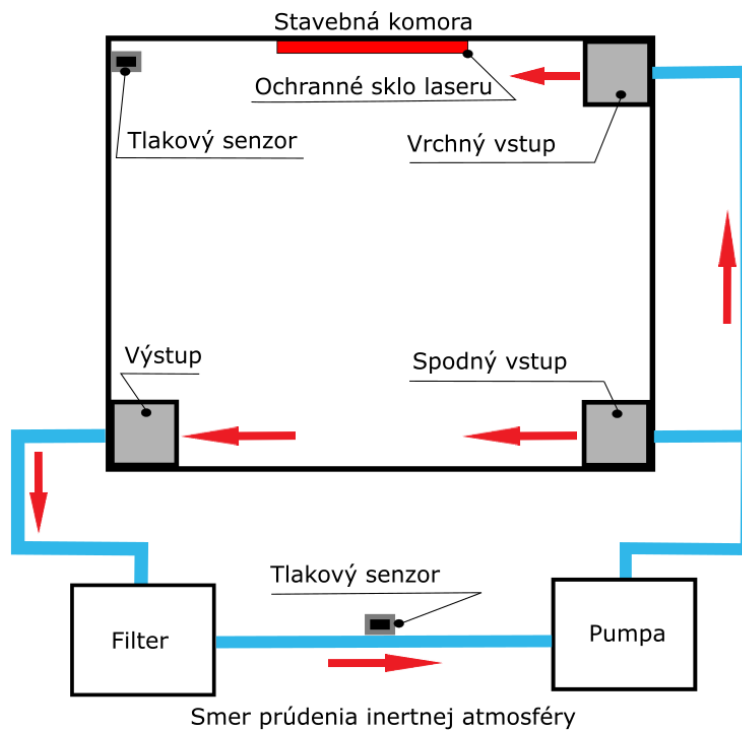
## 2.1 Cirkulačný okruh inertnej atmosféry

Proces SLM prebieha v stavebnej komore (viď Obr. 2-2) vyplnenej inertným plynom, ktorý prúdi v uzavretom cirkulačnom okruhu, pričom plní dve hlavné funkcie. Prvou funkciou inertného plynu je zabráňovať chemickým reakciám, ako je oxidácia alebo nitrácia. Druhou funkciou prúdenia inertného plynu v stavebnej komore je odvádzať kondenzát a splodiny preč zo stavebnej komory, aby nespôsobili rozptyľovanie laserového lúča a znižovanie jeho výkonu čo môže viesť k zhoršeniu kvality súčiastky [2].

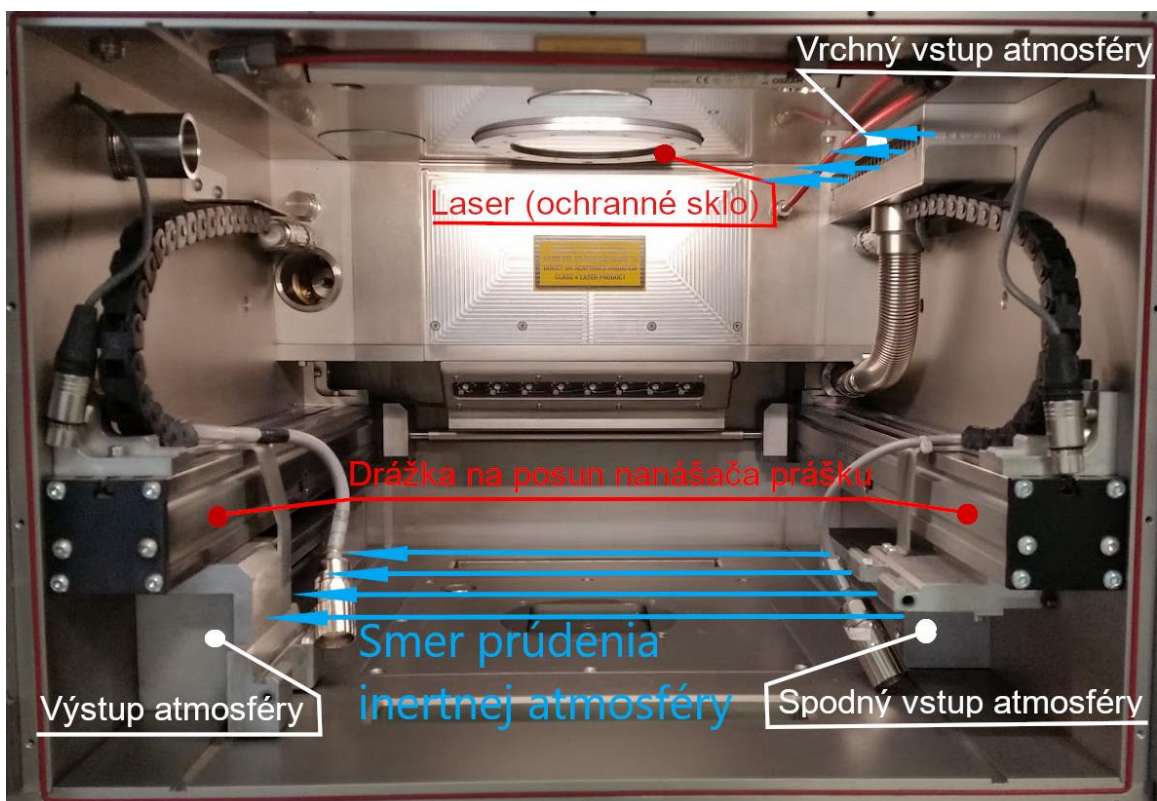


Obr. 2-2 Stavebná komora SLM.

Po naplnení stavebnej komory inertnou atmosférou, ktorú väčšinou tvorí argón alebo dusík je plyn hnaný pomocou pumpy do rozvodného potrubia, ktoré sa delí na dve vetvy (viď Obr. 2-3). Plyn prúdiaci cez prvú vetvu tvorenou trubkou s priemerom 40 mm je privádzaný do spodného vstupu z ktorého prúdi priamo do stavebnej komory (Obr. 2-3 a Obr. 2-4). Spodný vstup má za úlohu privádzať inertný plyn do miesta tavenia materiálu a zabráňovať tak chemickým reakciám, no zároveň má aj odvádzať kondenzát a splodiny priamo z miesta tavenia kovového prášku. Druhú vetvu tvorí trubka s priemerom 40 mm, ktorá sa zužuje na 27 mm, cez ktorú prúdi plyn do vrchného vstupu. Úlohou vrchného vstupu je ofukovať ochranné sklo laseru tak, aby sa na ňom neusádzal kondenzát a splodiny vznikajúce pri procese tavenia. Inertný plyn je spolu s kondenzátom a ostatnými splodinami odsávaný zo stavebnej komory pomocou jedného výstupu. Výstup je napojený na redukciu s priemerom 50 mm, z ktorej plyn prúdi cez potrubie priemeru 40 mm do filtračného systému na zachytenie kondenzátu a splodín vznikajúcich pri procese tavenia kovového prášku. Z filtračného systému je inertný plyn znovu privádzaný do pumpy a proces sa opakuje.



Obr. 2-3 Schéma cirkulačného okruhu inertnej atmosféry tlačiarne SLM 280HL.



Obr. 2-4 Stavebná komora bez bočníc a popis komponentov vplyvajúcich na prúdenie a návrh úprav.

Pumpa, pomocou ktorej je zaistená cirkulácia inertnej atmosféry v stavebnej komore, má maximálny prietok argónu stanovený výrobcom na 80 m<sup>3</sup>/h. Ďalšie technické špecifikácie sú uvedené v (Tab. 2-1).

Tab. 2-1 Technická špecifikácia nainštalovanej pumpy [7].

Technické parametre pumpy VASF 1.80/1-3110.01	
Prietok	80 m <sup>3</sup> /h
Pretlak	+ 230 mbar
Podtlak	- 220 mbar
Otáčky	3000 – 18 000 min <sup>-1</sup>
Príkon	0,8 kW

Charakter prúdenia a hlavne jeho rovnomernosť patrí k podstatným faktorom ovplyvňujúcim výslednú kvalitu súčiastky. Prúdenie v stavebnej komore môže byť rozdelené na prúdenie s usmerneným alebo neusmerneným tokom. Prúdenie s neusmerneným tokom z vrchu stavebnej komory je realizované napríklad na stroji Eosint M270 [2]. Usmernené prúdenie ponad práškové lôžko je realizované napríklad na stroji EOS Eosint M280 znázornené na (Obr. 2-5) a rozdielnych verziách strojov SLM 250 [2].



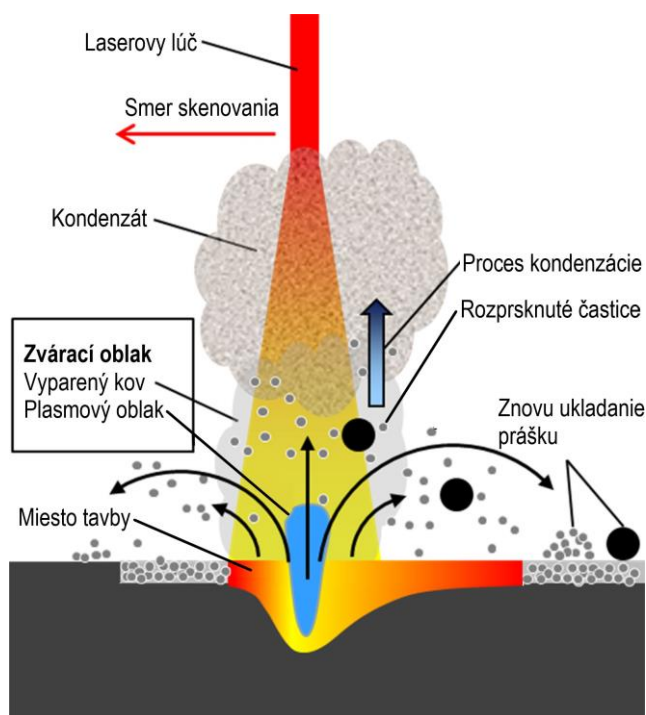
Obr. 2-5 Usmernené prúdenie v stavebnej komore EOS Eosint M280 [8].

## 2.2 Vznik vedľajších procesných produktov

Počas procesu SLM je produkovaných niekoľko vedľajších produktov, ktoré môžu v značnej miere narušovať proces výroby. Na eliminovanie týchto nežiadúcich vplyvov je potrebné pochopiť vznik vedľajších procesných produktov a ich dopad na ostatné procesy v stavebnej komore [2].

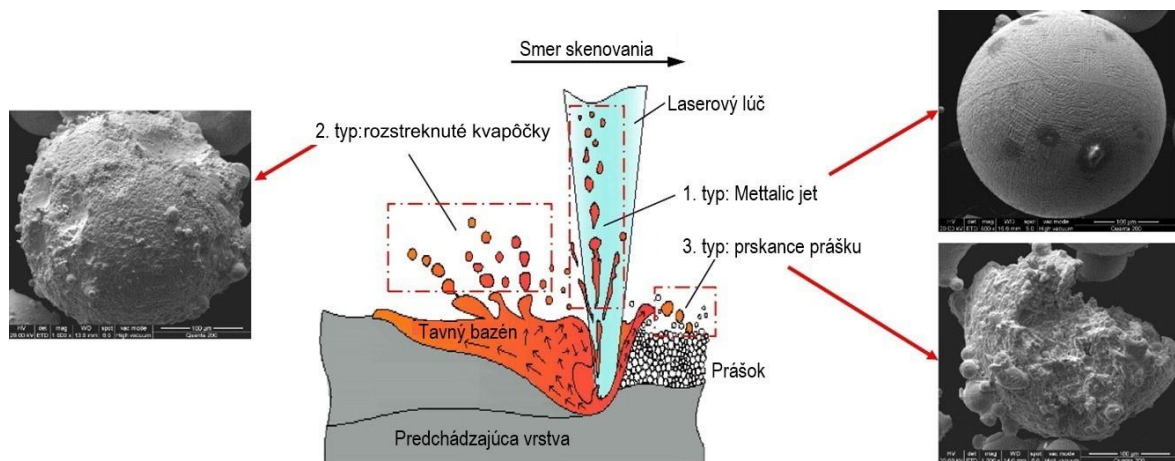
### 2.2.1 Vznik rozstreknutých častíc

Plyn nachádzajúci sa priamo nad interakčnou zónou laseru a kovového prášku začína ionizovať a vzniká plazmový oblak (viď Obr. 2-6). Vďaka vysokej energetickej hustote zaostreného laserového lúča roztavený prášok dosiahne teplotu vyparovania. Odparený kov je následne veľmi rýchlo schladený a kondenzuje, pričom vytvára častice s priemerom 10 nm až 150 nm [2]. Proces vzniku vedľajších produktov je znázornený na (Obr. 2-6).



Obr. 2-6 Schematické znázornenie vzniku možných vedľajších produktov [2].

Rozstrekovanie častíc z práškoveho lôžka je možné rozdeliť do troch typov, spôsobených buď Marangoniho efektom, spätným tlakom alebo vysokou teplotou v roztavenom práškovom lôžku. Tieto tri rozdielne zdroje vedú k trom tvarovým typom rozstreknutých častíc. Prvým sú rozstreknuté častice sférického tvaru („Metallic jet“), druhým sú rozstreknuté sférické častice s drsným povrchom (rozstreknuté kvapôčky), tretím sú nepravidelné častice (prskance prášku) (viď Obr. 2-7) [9]. Všetky opísané vedľajšie produkty môžu viesť k zvýšeniu hrúbky nanesej vrstvy prášku čo následne môže zabrániť splynutiu ďalších vrstiev [2].



Obr. 2-7 Mechanizmy formovania rozdielnych druhov rozptýlených častíc [9].

Zloženie rozstreknutých častíc je takmer rovnaké ako pôvodného prášku s tým rozdielom, že sa dramaticky zvýši obsah  $O_2$ , Si a C [9].

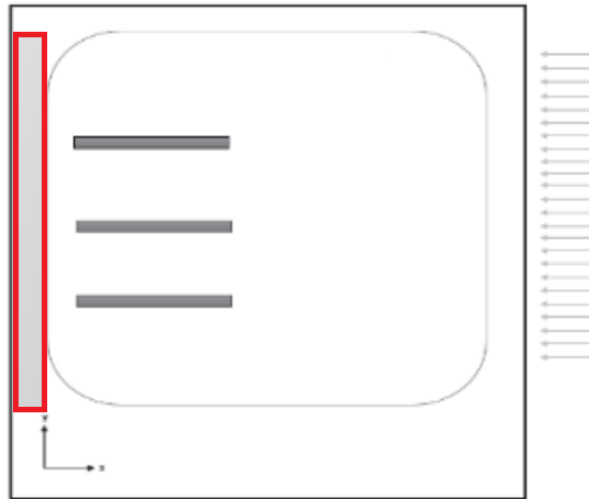
## 2.3 Vplyv rýchlosti inertnej atmosféry na akumuláciu vedľajších produktov

Anwar [10] skúmal vo svojej práci vplyv rýchlosti prúdenia inertnej atmosféry a skenovacej stratégie na rozstrekovanie častíc a ich akumuláciu v práškovom lôžku. Experimenty prebiehali na stroji SLM 280HL pričom prúdenie bolo nastavené v rozmedzí 30 % až 60 % maximálnej rýchlosti prúdenia. Kombinácie skenovacej stratégie a rýchlosti prúdenia použité pre experiment sú znázornené v (Tab. 2-2).

Tab. 2-2 Prípady, ktoré boli skúmané [10].

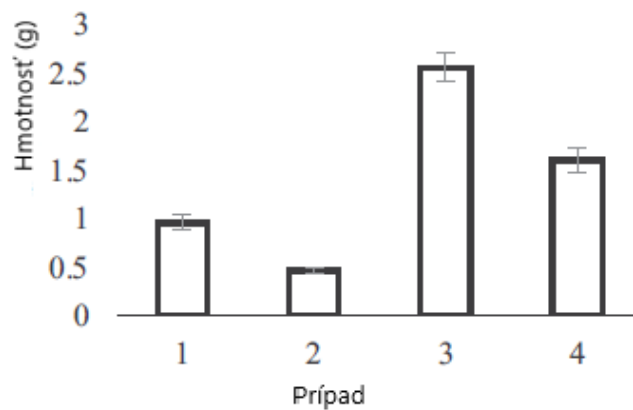
Prípad	Rýchlosť prúdenia	Smer skenovania
1	30 %	Proti smeru prúdenia
2	30 %	V smere prúdenia
3	60 %	Proti smeru prúdenia
4	60 %	V smere prúdenia

Prúdenie a skenovacia stratégia bola vyhodnocovaná v závislosti na akumulovanej hmotnosti vyprsknutého prášku v oblasti naznačenej na (Obr. 2-8). Pre každý prípad bolo získaných 5 vzoriek.



Obr. 2-8 Oblať v ktorej bola vyhodnocovaná hmotnosť akumulovaných častíc (naznačená červenou) [10].

Závislosť rýchlosti prúdenia, skenovacej stratégie a hmotnosti vystreknutého prášku akumulovaného v blízkosti výstupu zobrazuje (Obr. 2-9) [10].



Obr. 2-9 Graf závislosti rýchlosti prúdenia, skenovacej stratégie a vyprsknutej hmotnosti prášku akumulovaného v blízkosti výstupu [10].

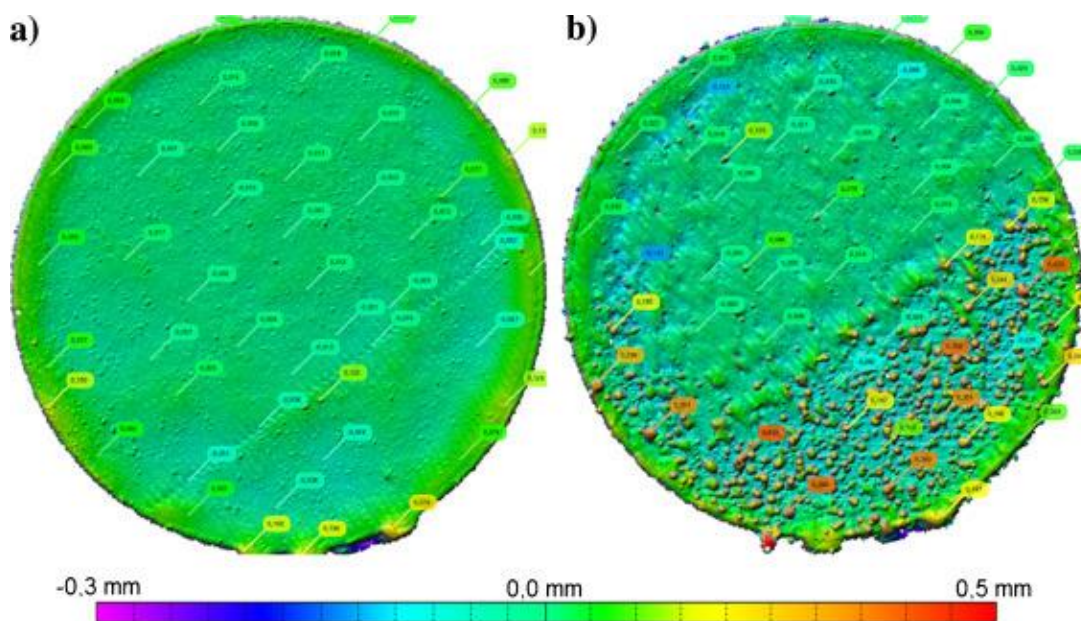
Rozstrekovanie častíc je v procese SLM neodvratný problém, ktorý ovplyvňuje ďalšie vrstvy nanoseného prášku. Z výsledkov vyplynulo, že zníženie rýchlosti prúdenia má za následok zníženie hromadenia rozstreknutého prášku pri výstupe, ale za cenu jeho neefektívneho odstraňovania z práškoveho lôžka spôsobujúceho kontamináciu ďalších vrstiev pri výrobe [10].

Ladewig [2] charakterizoval kvalitu prúdenia inertnej atmosféry pomocou šírky návarov. Bolo zistené, že nedostatočné odstraňovanie vedľajších produktov môže spôsobiť útlm laseru a tým pádom zväčšenie šírky jednotlivých návarov, čo spôsobuje zhoršenie kvality súčiastky. Z práce vyplýva, že nedostatočné odstraňovanie vedľajších produktov je spôsobené neusmerneným prúdením alebo nízkou rýchlosťou prúdenia inertnej atmosféry.

## 2.4 Vplyv prúdenia inertnej atmosféry na povrchové a objemové vady

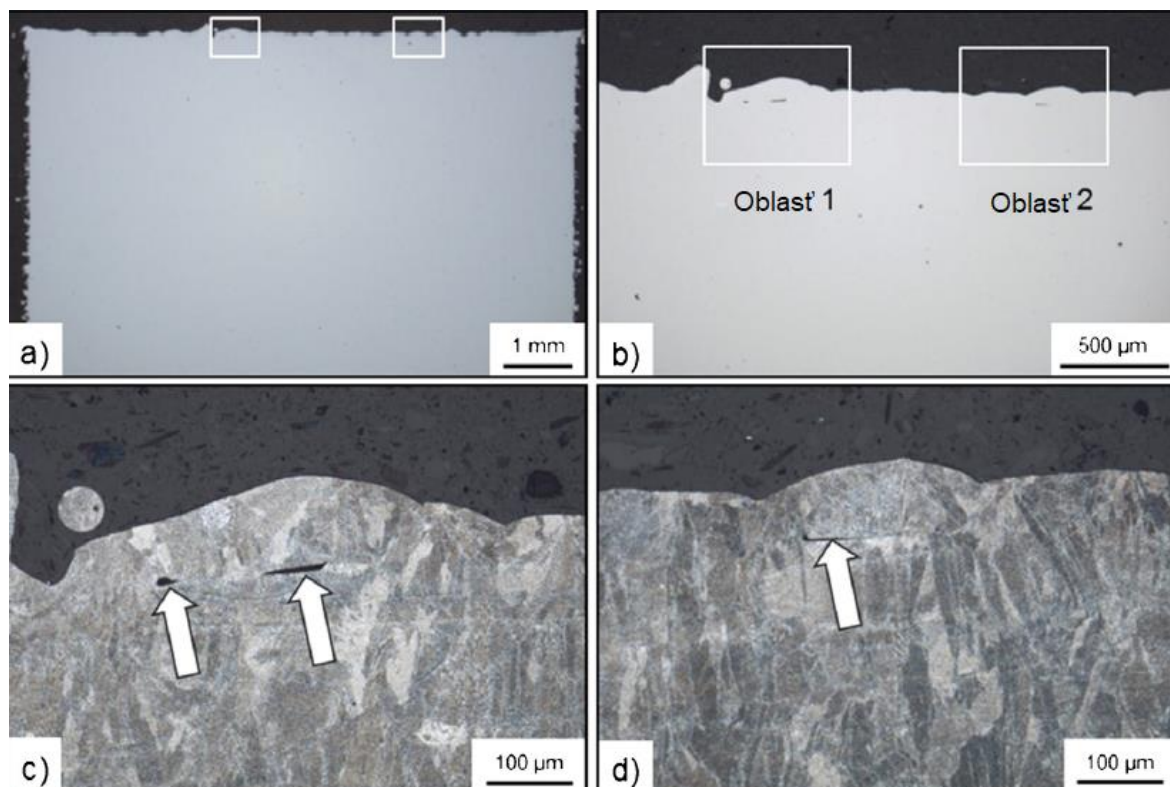
Znížením rýchlosti prúdenia v cirkulačnom okruhu je možné vyvolať proces rozstrekovania častíc. Čím bola rýchlosť prúdenia nižšia, tým častejšie sa daný proces vyskytoval [2]. Podľa Ladewiga [2] sa kvantitatívne posúdenie pravdepodobnosti tejto anomálie zdá byť neopodstatnené vzhľadom na skutočnosť, že existuje mnoho ďalších parametrov ako napríklad stratégia skenovania, geometria, pozícia na platforme atď., ktoré môžu rovnako vplývať na tento proces.

Za normálnych prevádzkových podmienok je výsledná povrchová štruktúra charakterizovaná homogénnou štruktúrou návaru (Obr. 2-10 a)). Aj keď je možné pozorovať určité rozdiely v relatívnej výške, tak tento povrch predstavuje normálnu a známu štruktúru pre nenarušený výrobný proces. Na rozdiel od toho na (Obr. 2-10 b)) je možné pozorovať vznik sférických útvarov tzv. balling efekt. Tento povrch je výsledkom rozstrekovania častíc vyvolaného nízkymi rýchlosťami prúdenia inertnej atmosféry. Veľkosť sférických štruktúr sa pohybuje v rozmedzí od 100  $\mu\text{m}$  do 400  $\mu\text{m}$  a značne presahuje strednú veľkosť častíc prášku [2].



Obr. 2-10 Konfokálna mikroskopia: a) povrchu vyrobeného zo štandardnými parametrami, b) povrchu vyrobeného zo zníženou rýchlosťou prúdenia, kde je jasne viditeľná tvorba sférických útvarov [2].

Miesta, kde bol pozorovaný proces rozstrekovania častíc sú na (Obr. 2-11). Po objavení týchto procesných odchýlok stavebný proces pokračoval ďalej pre ďalšie dve vrstvy kovového prášku. Vady, ktoré zobrazujú oblasti 1 a 2 na (Obr. 2-11) predstavujú typické indikácie nedostatku fúzie, ktoré boli pozorované vo viacerých oblastiach kde nastal proces rozstrekovania častíc. Veľkosť delaminácií vrstiev sa pohybovala od 100  $\mu\text{m}$  do 200  $\mu\text{m}$  [2].



Obr. 2-11 Miesta kde bol pozorovaný proces rozstrekovania častíc [2].

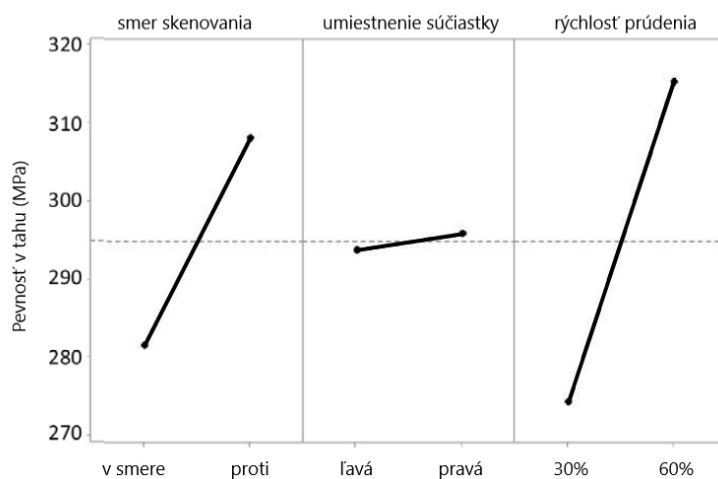
Na základe týchto zistení, boli formulované všeobecné odporúčania na optimalizáciu prúdenia inertnej atmosféry. Prietok by mal byť homogénny a nasmerovaný cez celý stavebný povrch. To zahŕňa nielen definovanú orientáciu prúdenia plynu, ale aj konštantnú rýchlosť prúdenia plynu vo všetkých oblastiach. Rýchlosť prúdenia plynu by mala byť čo najvyššia, z dôvodu efektívnejšieho odstraňovania vedľajších produktov. Tím sa zabráni ich opätovnému ukladaniu na pracovnom povrchu. Usmernené prúdenie plynu by malo byť tak blízko k stavebnému povrchu, aby zabránilo interakcii laseru s vedľajšími produktami. Vznik turbulencií vo vzostupnom smere by mal byť redukovaný na minimum, keďže by to malo znížiť pravdepodobnosť narušenia dráhy laserového lúča vedľajšími produktami [2].

Vyššie uvedené odporúčania je potrebné aplikovať opatrne. Tak aby boli všetky parametre v rovnováhe. Napríklad maximálny prietok plynu je limitovaný materiálom a charakteristikami prášku, pretože prekročenie maximálnej prietokovej rýchlosti bude viesť k lokálnemu odstraňovaniu nanesej vrstvy prášku. Taktiež je potrebné dbať na správne umiestnenie vstupu tak, aby nebol príliš nízko nad stavebným povrchom, pretože jeho umiestnenie príliš nízko môže zvyšovať pravdepodobnosť premiestňovania častíc naneseného kovového prášku [2].



## 2.5 Vplyv prúdenia inertnej atmosféry na pevnosť v ťahu

Anwar [11] skúmal vplyv troch faktorov na kvalitu vyrobenej súčiastky. Konkrétne sa jednalo o vplyv umiestnenia súčiastky v rámci stavebnej komory, rýchlosť prúdenia inertnej atmosféry a smer skenovania laseru v smere alebo proti smeru prúdenia. Experimenty prebiehali na stroji SLM 280HL. Ako indikátor kvality stavby bola použitá pevnosť súčiastky v ťahu. Smer skenovania bol nastavený zarovno zo smerom prúdenia. Súčiastky boli rovnomerne rozložené po ploche stavebnej roviny. Rýchlosť prúdenia bola nastavená buď na 30 % alebo 60 % maximálnej rýchlosti prúdenia. Hodnoty na 30 % maximálnej rýchlosti boli vyhodnotené ako približná rýchlosť prúdenia 1,43 m/s a na 60 % ako 2,87 m/s. Z výsledkov ich meraní vyplýva, že vyššia rýchlosť prúdenia a skenovanie proti smeru prúdenia vedie k vyššej pevnosti v ťahu (viď Obr. 2-12). Pričom umiestnenie súčiastky v stavebnej komore nemá na pevnosť v ťahu signifikantný vplyv.



Obr. 2-12 Závislosť pevnosti v ťahu na testovaných parametroch [11].

Výsledná vyššia kvalita súčiastky pri vyššej rýchlosti prúdenia plynu je často interpretovaná tak, že vyššia rýchlosť prúdenia je schopná odnášať väčšie množstvo prskajúceho prášku k výtoku atmosféry. Čo má za následok zanechanie menšieho množstva vyprsknutého prášku na práškovom lôžku a tým pádom sa produkuje súčiastka s vyššou kvalitou. Daný predpoklad sa potvrdil tým, že pri vyššej rýchlosti prúdenia bola vyrobená vzorka s vyššou pevnosťou v ťahu. Napriek tomu, že vyššia rýchlosť prúdenia zlepšuje kvalitu súčiastky, jej prílišné zvýšenie môže viesť k transportu čerstvo nanoseného prášku z práškoveho lôžka [11].

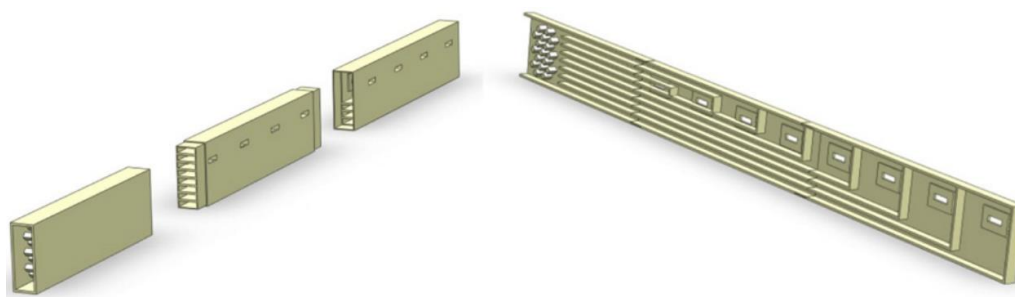
## 2.6 Vplyv prúdenia inertnej atmosféry na porozitu

Ferrar [4] sa vo výskume zaoberal aj vplyvom prúdenia na porozitu súčiastky. Porozitu je možné definovať na základe nasledovného vzťahu:

$$\text{Porozita} = \frac{m/V}{\rho} \quad (2)$$

kde  $m$  je hmotnosť vzorky v kg,  $V$  objem vzorky v  $\text{m}^3$ ,  $\rho$  hustota materiálu v  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Výskum sa zaoberal závislosťou rýchlosti prúdenia na porozite, pri dvoch rozdielnych modifikáciách vstupného kanálu inertnej atmosféry. Výsledná úprava vstupu inertnej atmosféry do stavebnej komory pozostávala z viacerých segmentov na distribúciu prúdenia (Obr. 2-13).



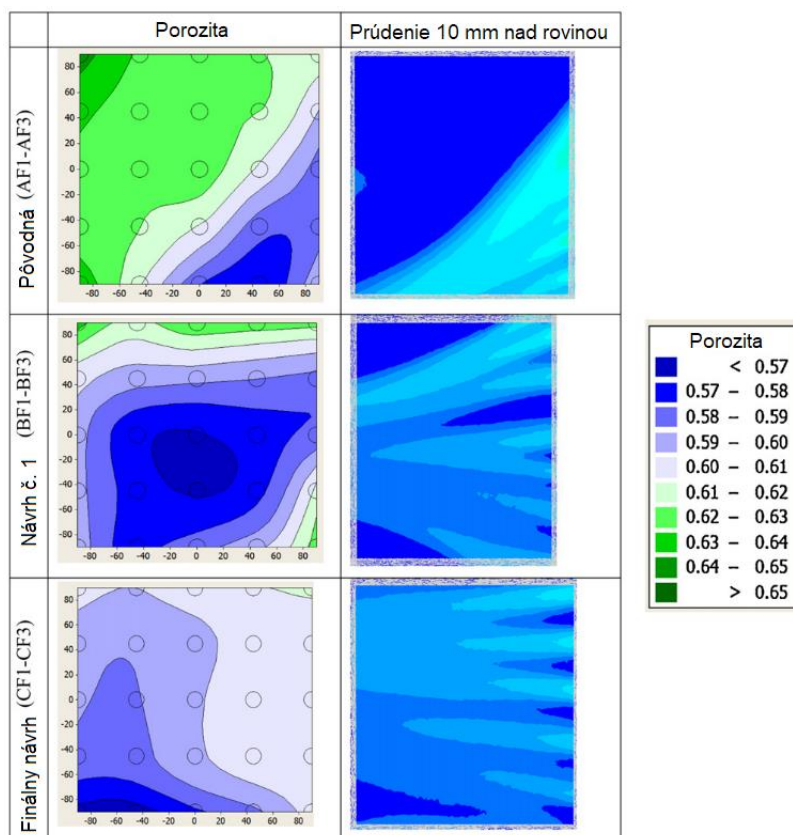
Obr. 2-13 Výsledná úprava vstupu inertnej atmosféry do stavebnej komory (vpravo v reze) [4].

Na kvantitatívne hodnotenie korelácie medzi prúdením plynu a porozitou bol použitý Pearsonov korelačný koeficient. Korelované boli rýchlosti prúdenia plynu získané za pomoci CFD simulácií pre tri konštrukčné varianty v troch výškach (1 mm, 10 mm, 20 mm) nad stavebnou rovinou. Rozsah rýchlostí bol od 0 m/s do 1 m/s. Výsledky sú uvedené v (Tab. 2-3). Kde hodnoty medzi 0–0,25 a od 0 do -0,25 reprezentujú slabú koreláciu, hodnoty medzi 0,25–0,75 a -0,25 až -0,75 reprezentujú dobrú koreláciu a hodnoty medzi 0,75–1 a -0,75 až -1 reprezentujú veľmi dobrú koreláciu [4].

Tab. 2-3 Pearsonova korelácia medzi rýchlosťou prúdenia a porozitou v rôznej výške nad stavebnou rovinou [4].

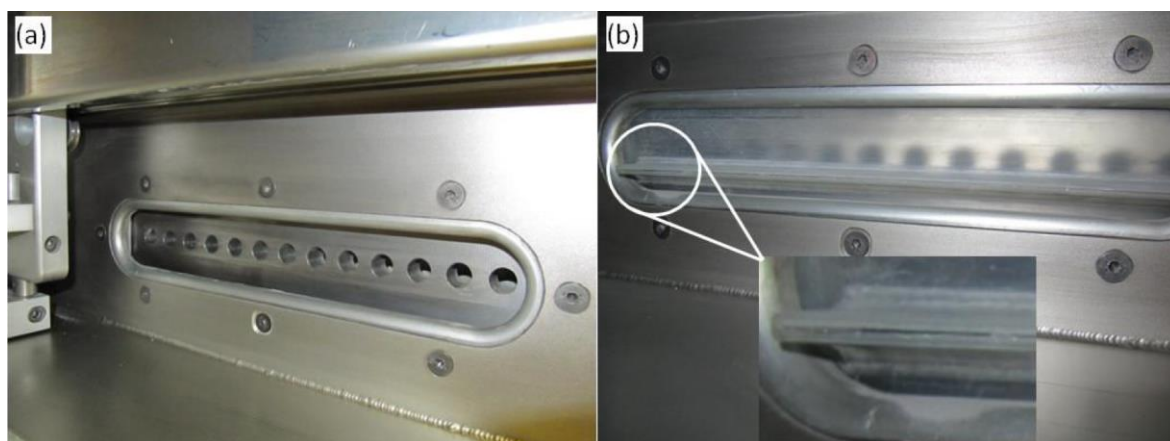
Korelácia prúdenia a porozity			
Prípád	Výška nad stavebnou rovinou	Pearsonov koeficient	Korelácia
Pôvodná konfigurácia vstupu	1 mm	-0,84	Veľmi dobrá
	10 mm	-0,81	Veľmi dobrá
	20 mm	-0,84	Veľmi dobrá
Prvá úprava vstupu	1 mm	0,29	Dobrá
	10 mm	-0,34	Dobrá
	20 mm	-0,46	Dobrá
Výsledná úprava vstupu	1 mm	0,58	Dobrá
	10 mm	0,37	Dobrá
	20 mm	-0,16	Slabá

Bolo zistené, že rovnomernosť prúdenia má dôležitý vplyv na porozitu súčiastky (viď Obr. 2-14) [4].



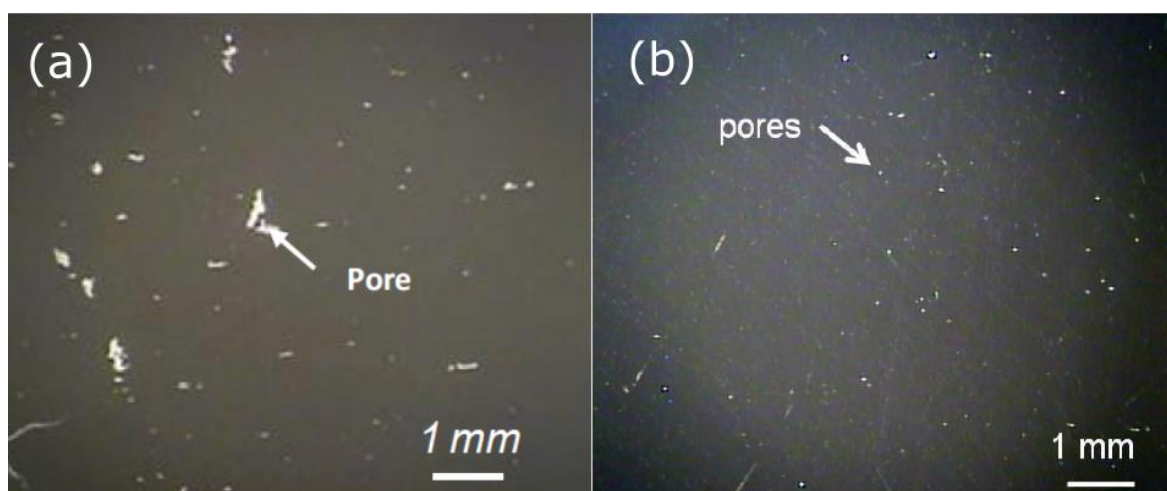
Obr. 2-14 Výsledky porozity pre jednotlivé konfigurácie vo výške 10 mm nad stavebným povrchom [4].

Kong [12] sa taktiež zaoberal vplyvom prúdenia na porozitu pred a po úprave vstupu inertnej atmosféry (vid' Obr. 2-15).



Obr. 2-15 Vstupy inertnej atmosféry v stavebnej komore. (a) pôvodný vstup, (b) upravený vstup z výrazným zúžením vstupného otvoru [12].

Presné porovnanie porozít jednotlivých vzoriek tento výskum nezahrňoval. No napriek tomu z výskumu vyplýva, že došlo k zmene porozity vzoriek (vid' Obr. 2-16).



Obr. 2-16 Porozita vzoriek (a) porozita pred úpravami; (b) porozita po úpravách [12].

## 2.7 Laminárne a Turbulentné prúdenie tekutiny

Ustálené laminárne prúdenie je charakteristické tým, že častice tekutiny sa pohybujú po paralelných dráhach, jednotlivé vrstvy sa medzi sebou nemiesia (neuvažuje sa molekulárna difúzia). Naopak pre turbulentné prúdenie sú typické pulzacie všetkých veličín vrátane rýchlosti. Pričom trajektórie častíc tekutiny sú nepravidelné a dochádza k intenzívnemu premiešavaniu celého objemu prúdiacej tekutiny [13],[14].

## 2.7.1 Vznik turbulencií

K najvýznamnejším a najrozšírenejším pohybom hmoty v technickej praxi a prírode patrí turbulentné prúdenie ako napríklad prúdenie atmosféry, úplav za loďami, vozidlami, lietadlami, prúdenie v potrubiach atď. [14]. Turbulentné prúdenie sa objavuje, keď zotrvačné sily prevládnu nad viskóznymi silami z čoho vyplýva, že Reynoldsove číslo musí prekročiť určitú hranicu. Určovanie tejto hodnoty je obtiažne, keďže turbulencii trvá nejaký čas kým sa objaví a vyvinie [15].

Vznik turbulencií sa dá popísať pomocou Reynoldsovho pokusu. Do potrubia sa tenkou trubičkou privádza zafarbená tekutina. Pri nízkych rýchlostiach prúdenia ostane farebné vlákno neporušené, teda ostáva v prúdnici do ktorej bolo privedené. Z čoho vyplýva, že pohyb sa deje po vrstvách a častice prúdiacej tekutiny sa nepremiešavajú. Postupným zvyšovaním rýchlosti od veľmi nízkej hodnoty je možné spočiatku pozorovať minimálne rozširovanie vlákna, pretože farbivo difunduje do okolia iba molekulárnymi pohybmi, teda sa jedná o laminárne prúdenie. Pri zvýšení rýchlosti nad jej kritickú hodnotu, dochádza k intenzívnemu miešaniu častíc tekutiny, následkom ich podružných (turbulentných fluktuácií) pohybom vo všetkých smeroch. Častice tekutiny sa okrem postupného pohybu v smere osy trubky pohybujú neusporiadane a neustále prechádzajú z jednej vrstvy do druhej, pričom dochádza k výmene kinetickej energie a vyrovnávaniu rýchlosti častíc po priereze. Ďalej prechádza prúdenie do turbulentného režimu, pri ktorom dochádza nielen k molekulovým pohybom ale hlavne k náhodným pohybom turbulentných vírov, ktorých rozmery sú približne o 4 rády väčšie ako je stredná voľná dráha molekúl [14].

Prakticky sa turbulencia objavuje pri hodnotách Reynoldsovho čísla približne nad  $Re_D \geq 3000$ . Reynoldsovo číslo určíme pomocou vzťahu [15]:

$$Re_D = \frac{\rho U_d D}{\mu} = \frac{U_d D}{\nu} \quad (3)$$

kde  $\rho$  je hustota v  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $\mu$  dynamická viskozita v  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ,  $U_d$  je stredná hodnota rýchlosti v danom priereze v  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $D$  je hydraulický priemer v m, pričom platí vzťah:

$$\nu = \mu/\rho \quad (4)$$

kde  $\nu$  je kinematická viskozita v  $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$  [15].

## 2.8 Experimentálne metódy vizualizácie prúdenia

K vyhodnoteniu kvality prúdenia a miest s nízkou rýchlosťou prúdenia je potrebné vizualizovať prúdenie inertnej atmosféry v stavebnej komore. Vizualizácia prúdenia inertnej atmosféry v stavebnej komore SLM tlačiarne môže byť realizovaná buď pomocou simulácie alebo meraním. Kvalita simulácie je silne závislá na presnom definovaní všetkých okrajových podmienok prúdenia plynu ako sú (geometria, tlak, vstupná rýchlosť, atď.). Pričom presnosť merania je závislá na samotnom meracom reťazci. K meraniu prúdenia vo vnútri stavebnej komory je možné využiť niekoľko metód, ktoré môžu byť kategorizované podľa toho či je zariadenie na meranie zaplavené prúdom plynu alebo nie [16].

K neinvazívnym spôsobom merania rýchlostného poľa môže byť zaradená metóda laserovej anemometrie (particle image velocimetry (PIV)) alebo laserová Dopplerová anemometria (laser Doppler anemometer (LDA)). Tieto metódy sú založené na princípe sledovania trajektórií jemných častíc, ktoré sa zvyčajne pridávajú do prúdenia. Pričom rýchlosť a smer prúdenia sú vypočítané zo zaznamenaných trajektórií týchto častíc za určitý čas.

Metódu laserovej anemometrie (PIV) je možné použiť na vizualizáciu prúdenia plynu ale iba v testovacích zariadeniach. Pretože pri komerčne využívaných tlačiarňach SLM táto metóda naráža na problém s kontamináciou stavebnej komory a filtračného systému. Preto je nutné využívať iné metódy merania [16]. Jednou z vhodných metód na invazívne meranie je použitie termického anemometra (hot wire anemometry (HWA)) alebo použitie metódy založenej na princípe merania rozdielu tlakov.

### 2.8.1 Metóda termickej anemometrie

Termický anemometer (anemometer zo žhavým vláknom) využíva k meraniu kovový drôt, ktorý je vyrobený z platiny alebo wolfrámu. Do drôtu je privádzaný elektrický prúd, kde odpor kladený drôtom spôsobuje jeho zahrievanie [15]. Vzťah ktorý popisuje závislosť teploty drôtu  $T_\omega$  v K a jeho elektrického odporu  $R_\omega$  v  $\Omega$  [15]:

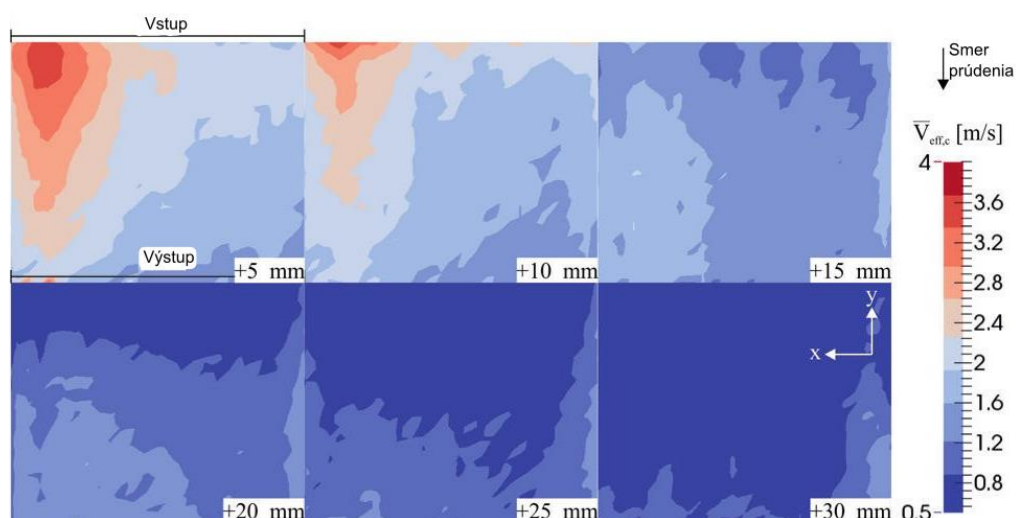
$$R_\omega = R_0[1 + \alpha_0(T_\omega - T_0)] \quad (5)$$

Kde  $R_0$  v  $\Omega$  je odpor drôtu pri referenčnej teplote  $T_0$  v K a  $\alpha_0$  je koeficient odporu materiálu drôtu v  $K^{-1}$ . Pričom prúdenie plynu okolo drôtu spôsobuje odvádzanie tepla. Závislosť rýchlosti prúdenia a teploty drôtu je popísaná vzťahom [15]:

$$m_\omega c_\omega \frac{dT_\omega}{dt} = R_\omega I_\omega^2 - (T_\omega - T)F(u_n) \quad (6)$$

Ľavá strana rovnice vyjadruje rýchlosť zmeny tepla v drôte, kde  $m_\omega$  je hmotnosť drôtu v kg,  $c_\omega$  je merná tepelná kapacita v  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $I_\omega$  prúd privádzaný do vodiča v A,  $F(u_n)$  rýchlosť obtekania vodiča v  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Schniedenharn [16] pomocou metódy termickej anemometrie vizualizoval prúdenie plynu v stavebnej komore SLM. K meraniu bol použitý modul, ktorý poskytuje iba hodnotu výstupného napätia, pričom rýchlosť prúdenia okolnej tekutiny je úmerná výstupnému napätiu. Preto bolo potrebné prístroj pred samotným meraním nakalibrovať v prostredí, kde bude prebiehať meranie. Vizualizácia prúdenia znázorňuje (Obr. 2-17) v šiestich paralelných rovinách v rôznych výškach nad stavebnou rovinou (v rozmedzí 5-30 mm nad stavebnou rovinou).



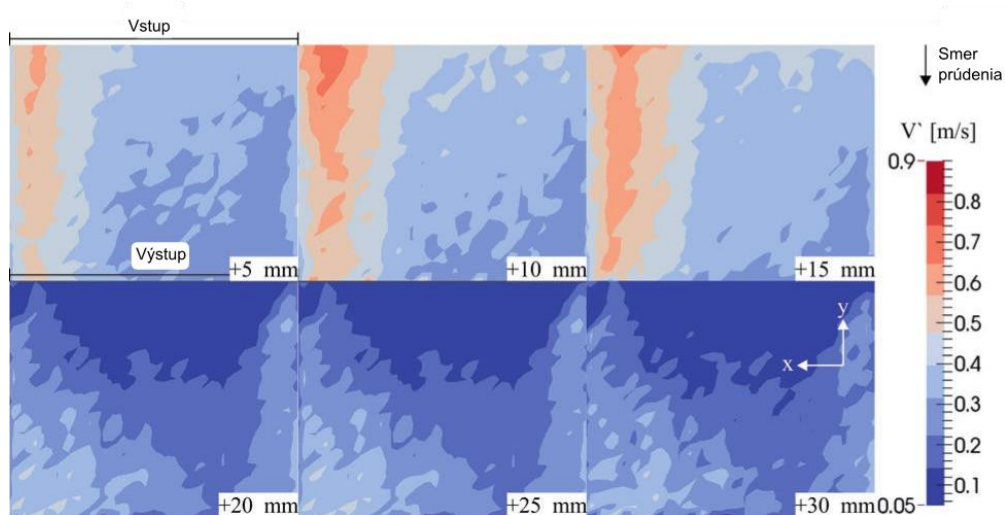
Obr. 2-17 Vizualizácia rýchlostí prúdenia v stavebnej komore SLM [16].

Pre všetky vizualizované roviny platí, že vstup inertnej atmosféry je vo vrchnej časti a výstup v spodnej časti vizualizácie. Rozsah rýchlostí prúdenia v komore sa pohyboval v rozmedzí  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  až  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Najväčšiu nehomogenitu rýchlostí je možné pozorovať v prvých troch rovinách, s vyššou rýchlosťou na ľavej strane. S väčšou vzdialenosťou od stavebnej roviny sa postupne rýchlosť v jednotlivých rovinách homogenizovala [16].

V meraniach bola vyhodnocovaná aj turbulentná zložka prúdenia a intenzita turbulencií. Intenzita turbulencií  $T_u$  popisuje turbulentnú zložku rýchlosti  $V'$  v  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , relatívne k strednej rýchlosti prúdenia  $\bar{V}$  v  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , popísanú vzťahom [16]:

$$T_u = \frac{V'}{\bar{V}} \quad (7)$$

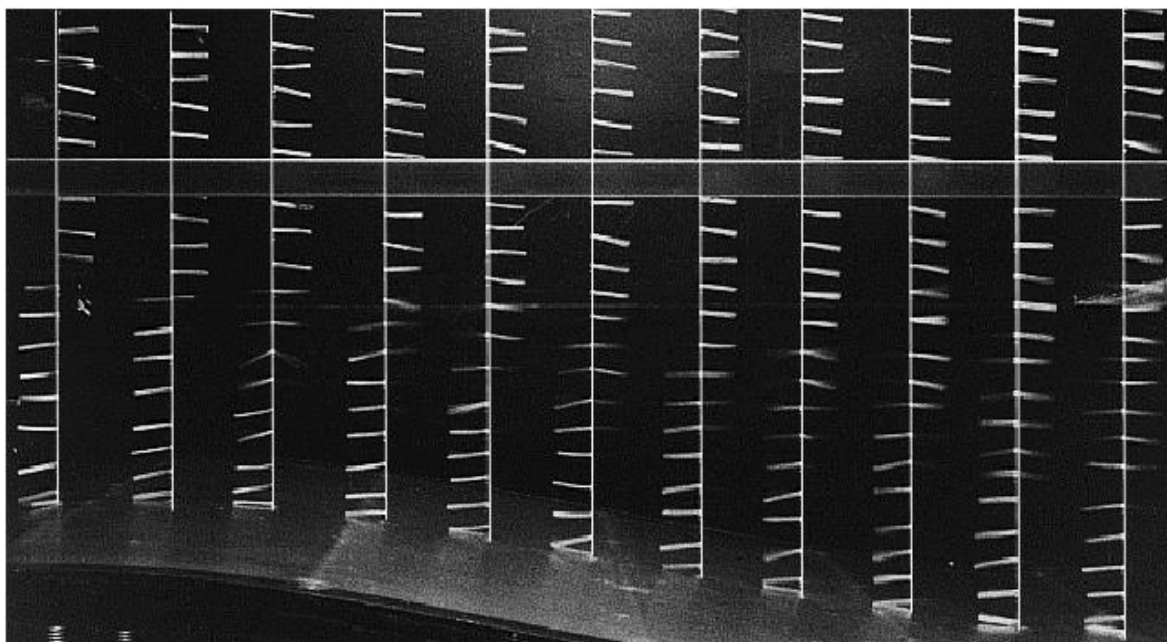
Turbulentná zložka prúdenia je zobrazená na (Obr. 2-18), z ktorého vyplýva, že turbulentná zložka stúpa spolu so zvyšujúcou sa rýchlosťou prúdenia a zobrazuje nehomogénne rozloženie naprieč všetkými rovinami [16].



Obr. 2-18 Vizualizácia turbulentnej zložky rýchlosti prúdenia [16].

## 2.8.2 Metóda niťových sond

Jednou z metód na vyhodnotenie charakteru prúdenia a jeho vizualizáciu je metóda niťových sond (Obr. 2-19). V podstate sa jedná o techniku na indikovanie smeru prúdenia v oblasti prúdenia mimo povrch telesa. V rovine kolmej na smer prúdenia je umiestnená mriežka v ktorej sú priviazané alebo nalepené krátke nite v uzlových bodoch mriežky. Mriežka je pozorovaná a fotografovaná z polohy po prúde. Pričom výsledný vzor je podobný vzoru získanému z pozorovania prúdu do ktorého je pridávaný dym [17].



Obr. 2-19 Vizualizácia prúdenia pomocou metódy niťových sond (tuft grid) [18].



## 2.9 CFD simulácie

Pri návrhu budú využívané CFD simulácie, ktorých presnosť je závislá na nastavení okrajových podmienok, kvalite výpočtovej siete a podstatnú rolu hrá aj správna voľba turbulentného modelu, ktorá je popísaná v kapitole nižšie.

### 2.9.1 Modelovanie turbulencií

Turbulencia je v princípe vysvetlená pomocou Navier-Stokesových rovníc. Vo väčšine prípadov však nie je možné vyriešiť široké spektrum turbulencií v dohľadnom čase a priestore pomocou priamych numerických simulácií (Direct Numerical Simulation - DNS), pretože požiadavky kladené na CPU by ďaleko prekročili dostupný výpočtový výkon. Preto, je nutné na Navier-Stokesove rovnice aplikovať priemerovanie, aby bolo možné určiť aspoň časť turbulentného spektra. Najpoužívanejšie je časové stredovanie veličiny turbulentného prúdenia pomocou Reynoldsovej rovnice z ktorého plynú (Reynolds-Averaged Navier-Stokes - RANS) rovnice [19]. Ďalšou možnosťou riešenia je metóda veľkých vírov (Large Eddy Simulation – LES), ktorá filtruje malé fluktuácie a rieši iba časť turbulentného spektra [20].

Metódou (Direct Numerical Simulation - DNS) je teoreticky možné riešiť celé spektrum veľkostí turbulentných fluktuácií. Vyžaduje jemnú sieť, pričom veľkosť buniek rádovo odpovedá veľkosti najmenších vírov (tzv. Kolmogorove mikromerítka turbulencie). Počet buniek prudko narastá s Reynoldsovým číslom  $N_{DNS} \approx Re^{9/4}$  [20]. Riešenie pomocou tejto metódy je zrovnateľné s experimentálnymi meraniami [21]. Avšak kvôli vysokému množstvu elementov siete a časovo závislej simulácii vedie k technickej náročnosti výpočtu. Preto sa používa len v špeciálnych prípadoch pre výskumné účely [20].

Metóda veľkých vírov (Large Eddy Simulation – LES) je založená na riešení vírov ako priestorovo a časovo závislých útvarov, ktoré je možné zachytiť sieťou. Vďaka riešeniu len veľkých vírov je možné použiť hrubšiu sieť a väčší krok ako v prípade metódy DNS, ale v porovnaní s metódou RANS musí byť sieť podstatne jemnejšia a výpočet je omnoho náročnejší [20].

Metóda časového stredovania (Reynolds-Averaged Navier-Stokes - RANS) sa využíva pre väčšinu inžinierskych úloh s turbulentným prúdením. Metóda spočíva v aplikácii štatistických metód pri riešení a zjednodušovaní základných rovníc [21]. Simulácia je vykonaná za pomoci Navier-Stokesových rovníc stredovaných podľa Reynoldsa, v ktorých je potrebné nahradiť fluktuácie rýchlosti modelom turbulencie. Modely turbulencií typu  $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$  a ďalšie zavádzajú navyše turbulentnú viskozitu [20].

## 2.9.2 RANS modely turbulencií

Keďže metóda RANS sa javí byť ako najvhodnejšia, tak nasledujúca kapitola je venovaná výberu vhodného turbulentného modelu založeného na tejto metóde. Kapitola sa bude zaoberať hlavne modelmi turbulencií, ktoré majú potenciál pre simuláciu v stavebnej komore.

Spalart-Allmaras je jednorovnicový model, ktorý bol navrhnutý pre letecké aplikácie, kde sa rieši medzná vrstva vystavená veľkému tlakovému gradientu. Nedá sa použiť ako obecný model, pretože nie je kalibrovaný na bežnú priemyslovú aplikáciu a vykazoval by veľkú chybu pre voľné šmykové prúdenie [20].

Modely  $\kappa$ - $\epsilon$  (Standard, RNG, Realizable) sú dvoj rovnicové modely turbulencie, preto umožňujú určenie dĺžkovej aj časovej mierky riešením dvoch samostatných transportných rovníc. Všetky modely  $\kappa$ - $\epsilon$  riešia transportné rovnice pre  $\kappa$  a  $\epsilon$  a modelujú Reynoldsove napätie pomocou turbulentnej viskozity  $\mu_t$ . Rozdiel medzi nimi je v spôsobe stanovenia turbulentnej viskozity, v turbulentných Prandtlových číslach riadiacich turbulentnú difúziu  $\kappa$  a  $\epsilon$  a v podmienkach generácie a zániku rovnice pre  $\epsilon$  [20].

Standard  $\kappa$ - $\epsilon$  je polo-empirický model a odvodené rovnice sa značne spoliehajú na empiriu a úvahy. Hlavným predpokladom je, že prúdenie je plne turbulentné a efekt molekulárnej viskozity je zanedbateľný. Tento model je použiteľný len pri vysokých Reynoldsových číslach [20].

Model RNG  $\kappa$ - $\epsilon$  je podobný modelu standard, ale obsahuje niekoľko vylepšení. Je presnejší a spoľahlivejší ako model standard  $\kappa$ - $\epsilon$  [20].

Model realizable  $\kappa$ - $\epsilon$  je najnovší model z vyššie uvedených modelov  $\kappa$ - $\epsilon$ . Štúdie ukazujú, že model realizable  $\kappa$ - $\epsilon$  poskytuje najlepší výkon oproti ostatným modelom  $\kappa$ - $\epsilon$ , a preto je jeho použitie najviac odporúčané. Trpí jedným nedostatkom v podobe vytvárania nefyzikálnej turbulentnej viskozity v situáciách, kedy sa výpočtová oblasť skladá z rotačnej a stacionárnej zóny [20].

Modely  $\kappa$ - $\omega$  sú dvoj rovnicové modely a podobne ako modely  $\kappa$ - $\epsilon$  riešia dve dodatočné diferenciálne rovnice. Modely  $\kappa$ - $\omega$  obvykle lepšie predikujú záporný tlakový spád, medzné vrstvy a odtrhnutie prúdenia [20].

## 2.9.3 Stenové funkcie

Výrazný vplyv na turbulentné prúdenie má práve prítomnosť stien. V ich blízkosti dochádza k značnému gradientu rýchlosti a ďalších veličín. Turbulencia je pri stene potlačená, ale smerom k vonkajšej časti medznej vrstvy turbulencia rýchlo narastá. Steny predstavujú hlavný zdroj vírov a turbulencií, preto modelovanie prúdenia v blízkosti stien ovplyvňuje presnosť riešenia v celej oblasti [20].

Množstvo experimentov ukázalo, že oblasť v blízkosti stien môže byť rozdelená na tri vrstvy. Vrstva nachádzajúca sa najbližšie pri stene sa nazýva viskózna podvrstva. V tejto vrstve je prúdenie takmer laminárne. Naproti tomu vrchná vrstva je nazývaná ako oblasť plne vyvinutej turbulencie. Medzi týmito dvoma vrstvami sa nachádza prechodová vrstva [22].

Standard Wall Functions je stenová funkcia často využívaná pri modelovaní prúdenia v priemyselných potrubiach napríklad chladiace systémy, prípadne odpadové vody atď. [22]. Doporučované bývajú hodnoty  $y^+ > 30$  [20].

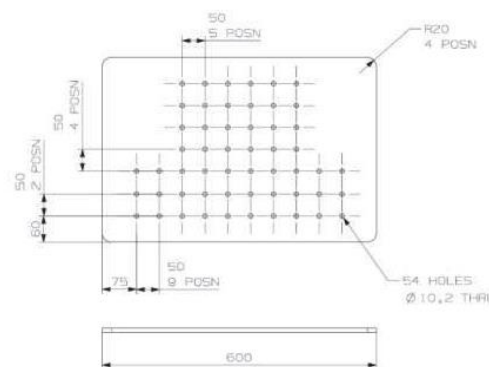
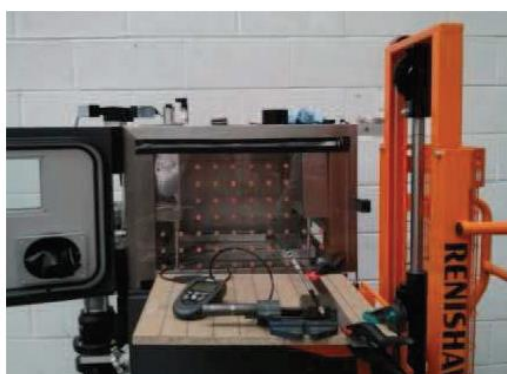
Scalable Wall Functions znižuje závislosť riešenia na hodnote  $y^+$ . Pomocou tejto funkcie je možné dosiahnuť reálnejšie výsledky. No napriek tomu je vhodné používať adekvátne rozlíšenie v medzných vrstvách [20].

Non-Equilibrium Wall Functions je stenová funkcia pomocou ktorej je možné dosiahnuť presnejších výsledkov tam, kde nie sú splnené podmienky lokálnej rovnováhy, napríklad prúdenie pri stene, ktorá je vystavená veľkým tlakovým gradientom [20].

Enhanced Wall Treatment predstavuje metódu modelovania prúdenia v blízkosti stien, ktorá kombinuje dvojvrstvý model. Pokiaľ je výpočtová sieť v blízkosti stien dostatočne jemná ( $y^+ \approx 1$ ), aby bolo možné riešiť viskóznou podvrstvu použije sa dvojvrstvý model, ktorý rozdelí riešenú oblasť na časť kde sa prejavuje vplyv viskozity a plne turbulentnú oblasť. Pokiaľ je sieť hrubšia môže modelovanie skombinovať zo stenovou funkciou. Je vhodné sa vyhnúť sieti zo strednou jemnosťou  $2 < y^+ < 15$ , kde dochádza k znižovaniu presnosti [20].

## 2.10 Porovnanie simulačných modelov a ich overenie

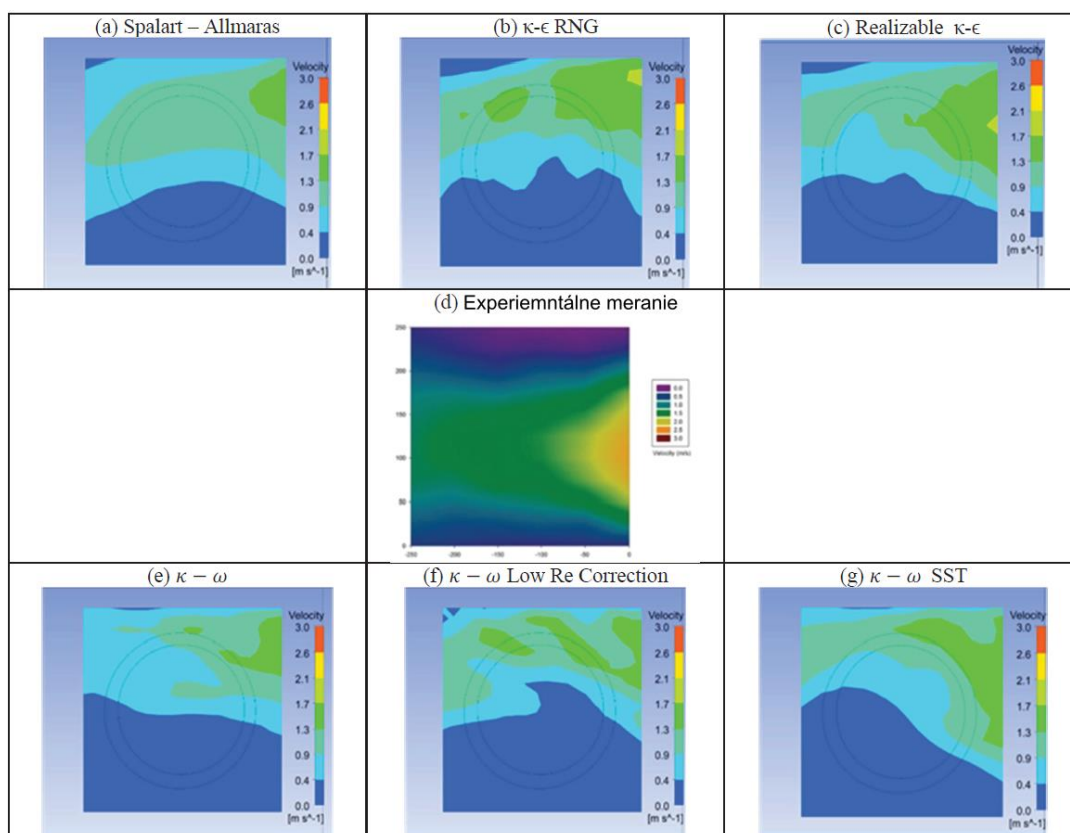
Philo [23] používal na simuláciu prúdenia v stavebnej komore program Ansys Fluent a na následné overenie simulačných modelov bola použitá metóda termickej anemometrie. Experimentálne meranie prúdenia prebiehalo na stroji Renishaw s objemovým prietokom inertnej atmosféry  $20 \text{ m}^3/\text{h}$  (Obr. 2-20).



Obr. 2-20 Meracia aparatúra použitá pri experimentálnom overení prúdenia [23].

Na výpočtový model bola spočiatku používaná kombinácia sietí prvkov a to tetragonálna a hexagonálna sieť. V oblastiach diskretizovaných pomocou kombinovaných prvkov, sa vyskytovali problémy s konvergenciou, a to najmä s konvergenciou rovnice kontinuity, ktorá stagnovala na hodnote  $10^{-2}$  a to aj po veľkom počte iterácií. Medzi možné príčiny patrila diskontinuita na rozhraní medzi rôznymi typmi elementov, alebo veľké rozdiely v mierke medzi náhlymi rozšíreniami úzkych vstupných otvorov do relatívne veľkej stavebnej komory. Riešenie týchto problémov našli v použití tetragonálnej siete v celom objeme s jemne meniacou sa veľkosťou prvkov.

Porovnaním výpočtových modelov s experimentálnym meraním metódou termickej anemometrie je možné usúdiť, že ako najvhodnejší model na simulácie sa v tomto konkrétnom prípade sa javí byť model realizable  $\kappa$ - $\epsilon$  (Obr. 2-21) [23].

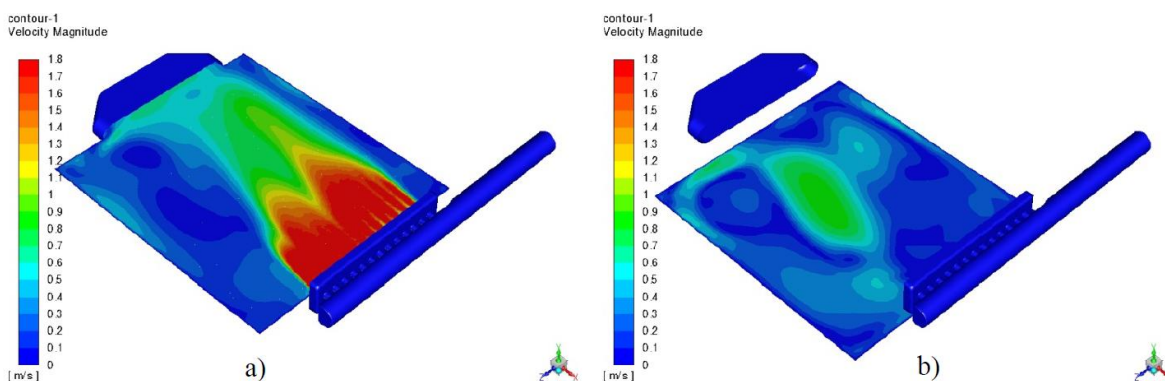


Obr. 2-21 Modely prúdenia v programe Ansys Fluent v porovnaní s experimentálnym meraním metódou termickej anemometrie [23].

## 2.11 Konštrukčné riešenia úpravy geometrie vstupov a výstupov atmosféry

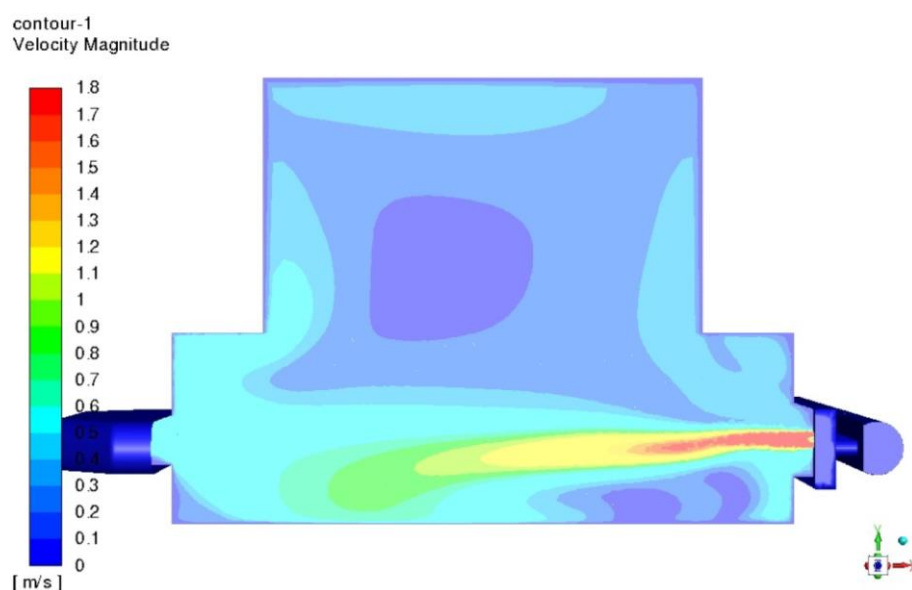
Homogénnejšie prúdenie v stavebnej komore SLM je možné dosiahnuť pomocou jej vhodného tvaru a hlavne návrhom vhodnej geometrie vstupu inertnej atmosféry. K modifikáciám, ktoré je možné aplikovať na úpravu prúdenia inertnej atmosféry v stavebnej komore patrí modifikácia geometrie vstupu a výstupu a ich umiestnenia vzhľadom na stavebnú rovinu, tak aby bolo prúdenie naprieč stavebnou komorou rovnomernejšie.

Chen [24] skúmal prúdenie inertného plynu v stavebnej komore za pomoci CFD simulácií. Na základe analyzovania simulácií vykonal úpravu geometrie vstupných otvorov inertnej atmosféry, tak aby bola rýchlosť prúdenia nad stavebnou rovinou rovnomernejšia. Pri simuláciách bol použitý virtuálny model komory tlačiarne Renishaw AM250 vytvorenej v programe Ansys Fluent. Inertný plyn prúdi do stavebnej komory pomocou trubky s dĺžkou 550 mm a priemerom 40 mm ďalej sa rozdeľuje do 13 okrúhlych otvorov s priemerom 12 mm a dĺžkou 18 mm. Stred vstupných otvorov sa nachádza 67,5 mm nad stavebnou rovinou v ktorej je umiestnená stavebná platforma s rozmermi 271 mm x 271 mm. CFD simulácia prúdenia plynu vo vnútri stavebnej komory bola realizovaná v programe Ansys Fluent, kde bolo definované ustálené prúdenie a nestlačiteľný turbulentný model prúdenia. Na výpočtový model boli použité štandardné Navier-Stokesove rovnice a turbulentný model prúdenia  $\kappa$ - $\epsilon$ . Vstup bol definovaný pomocou hmotnostného prietoku ako 0,0051 kg/s s 2 % intenzitou turbulencií. Rýchlosť prúdenia plynu zo vstupných otvorov sa pohybovala okolo hodnoty  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Sieť prvkov potrebná na výpočet bola vytvorená pomocou kombinácie štvorstenov a šesťstenov. Výsledky simulácií prúdenia v originálnej konfigurácii boli vyhodnotené v dvoch rovinách rovnobežných zo stavebnou rovinou. Z výsledkov na (Obr. 2-22) vyplýva, že rýchlosť prúdenia v rovine 3 mm nad stavebným povrchom je nerovnomerná.



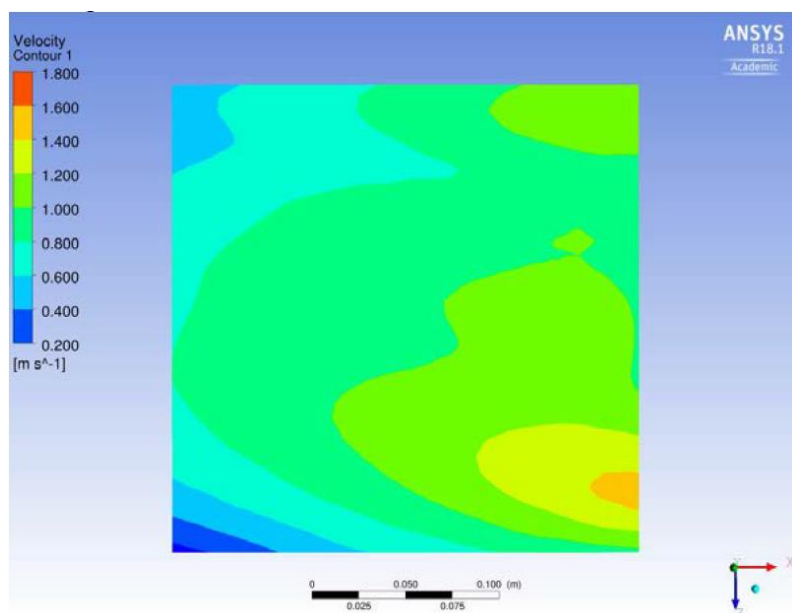
Obr. 2-22 Zobrazenie kontúr rýchlosti pre originálnu geometriu: a) v rovine prechádzajúcej stredom vstupnej trysky, b) v rovine 3 mm nad stavebnou rovinou [24].

K vyhodnoteniu nerovnomerného prúdenia, bol vytvorený aj bočný pohľad vo vnútri stavebnej komory (vid' Obr. 2-23).



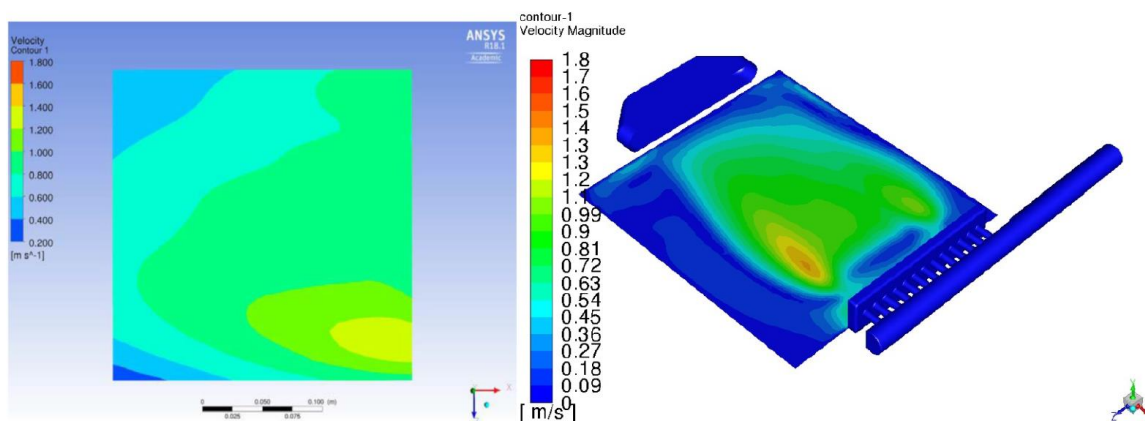
Obr. 2-23 Zobrazenie kontúr rýchlosti v bočnom pohľade na stavebnú komoru [24].

Z vyhodnotenia (vid' Obr. 2-22, Obr. 2-23) bolo zistené, že vstupné otvory sú príliš vysoko v porovnaní so spodnou rovinou komory. Táto vzdialenosť medzi vstupným otvorom a stavebnou rovinou spôsobuje padanie prúdu plynu z oblasti rýchleho prúdenia na stavebnú rovinu, čo spôsobuje nerovnomernosť prúdenia. Redukciou výšky vstupných otvorov sa predpokladalo zvýšenie kvality prúdenia. Z (Obr. 2-24) je zrejmé, že po redukcii výšky vstupných otvorov sa rýchlosť prúdenia nad stavebnou rovinou stala rovnomernejšou [24].



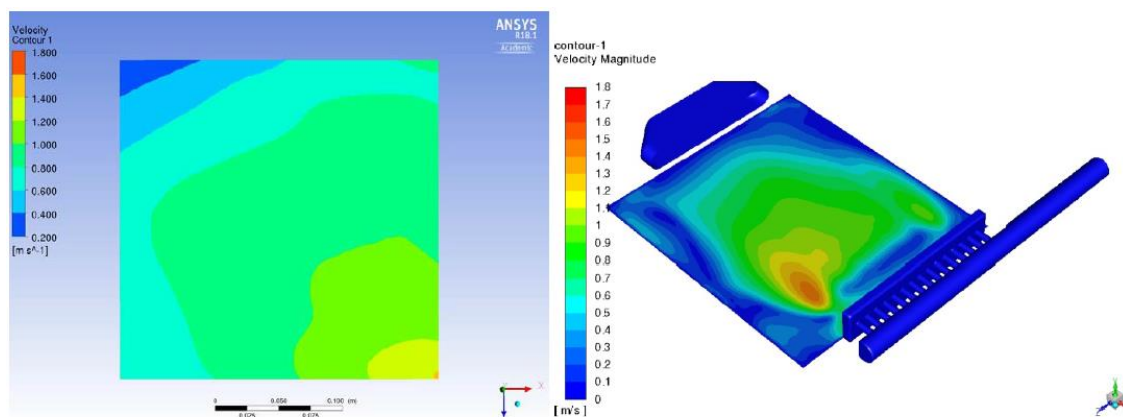
Obr. 2-24 Kontúry rýchlosti v oblasti 3 mm nad stavebnou rovinou po úprave výšky vstupných otvorov [24].

Napriek tomu, sa nad stavebnou rovinou vyskytovali oblasti s nerovnomernou rýchlosťou. Jednou z možných príčin, ktoré spôsobovali nehomogenitu rýchlosti prúdenia mohli byť aj príliš krátke prívodné vstupné otvory, ktoré neumožňujú prúdeniu kompletne zmeniť smer po prechode cez vstupnú trubku. Takže vychádzali z predpokladu, že dlhšie vstupné otvory by mali umožniť lepšie usmernenie prúdenia. Predpoklad bol potvrdený vizualizáciou kontúr rýchlostí znázornených na (Obr. 2-25) [24].



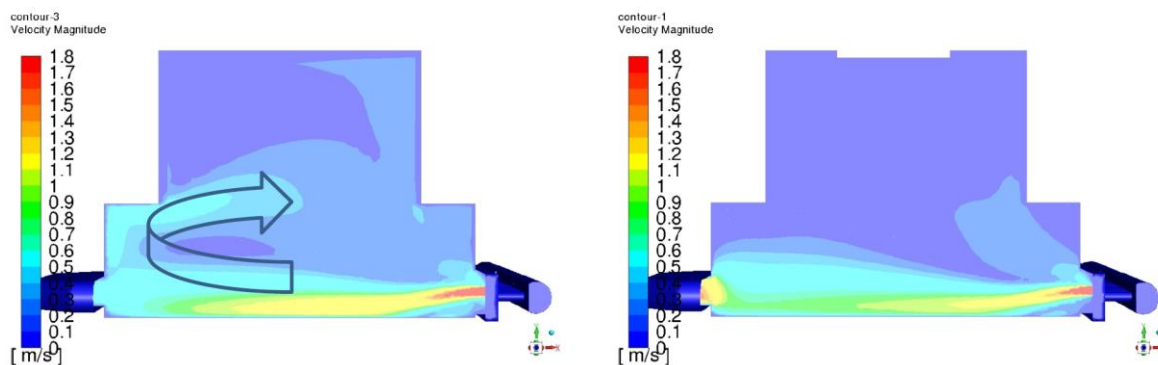
Obr. 2-25 Kontúry rýchlosti vo výške 3 mm nad stavebnou rovinou po úprave výšky vstupných otvorov a ich predĺžení na ľavej strane je vykreslená časť stavebnej roviny, kde prebieha stavba a na pravej strane je celá stavebná komora [24].

Navzdory úpravám sa v ľavom spodnom rohu vyskytovala oblasť s vysokou rýchlosťou prúdenia (viď Obr. 2-25). Tento problém bol riešený pomocou zvýšenia počtu vstupných otvorov z 13 na 15 čo spôsobilo premiestnenie oblasti s vysokou rýchlosťou prúdenia mimo stavebnú platformu. Prúdenie priamo nad stavebnou platformou sa tak stalo rovnomernejším (viď Obr. 2-26) [24].



Obr. 2-26 Kontúry rýchlosti 3 mm nad stavebnou rovinou po úprave výšky vstupných otvorov ich predĺžení a zvýšení počtu vstupných otvorov z 13 na 15. Na ľavej strane je vykreslená len oblasť stavebnej platformy a na pravej je celá stavebná komora [24].

Rovnomernosť prúdenia ponad stavebnú rovinu má zásadný vplyv na proces SLM, ale taktiež je potrebné skúmať recirkuláciu prúdenia v celom objeme stavebnej komory, aby nedochádzalo k usádzaniu zvyškov z tavenia kovového prášku na stenách a ochrannom skle laserového lúča. Ako je vidieť z (Obr. 2-27) recirkulácia je silne potlačená zostupným prúdením plynu z vrchnej steny, ktorá vháňa časť atmosféry do komory. Sekundárne zostupné prúdenie sa spája s hlavným prúdom a potláča smerom nadol hlavný prúd veľmi efektívne [24].



Obr. 2-27 Bočný pohľad na kontúry rýchlosti naprieč stavebnou komorou vľavo bez sekundárneho prúdenia vpravo prejav efektu sekundárneho prívodu atmosféry z vrchnej časti [24].

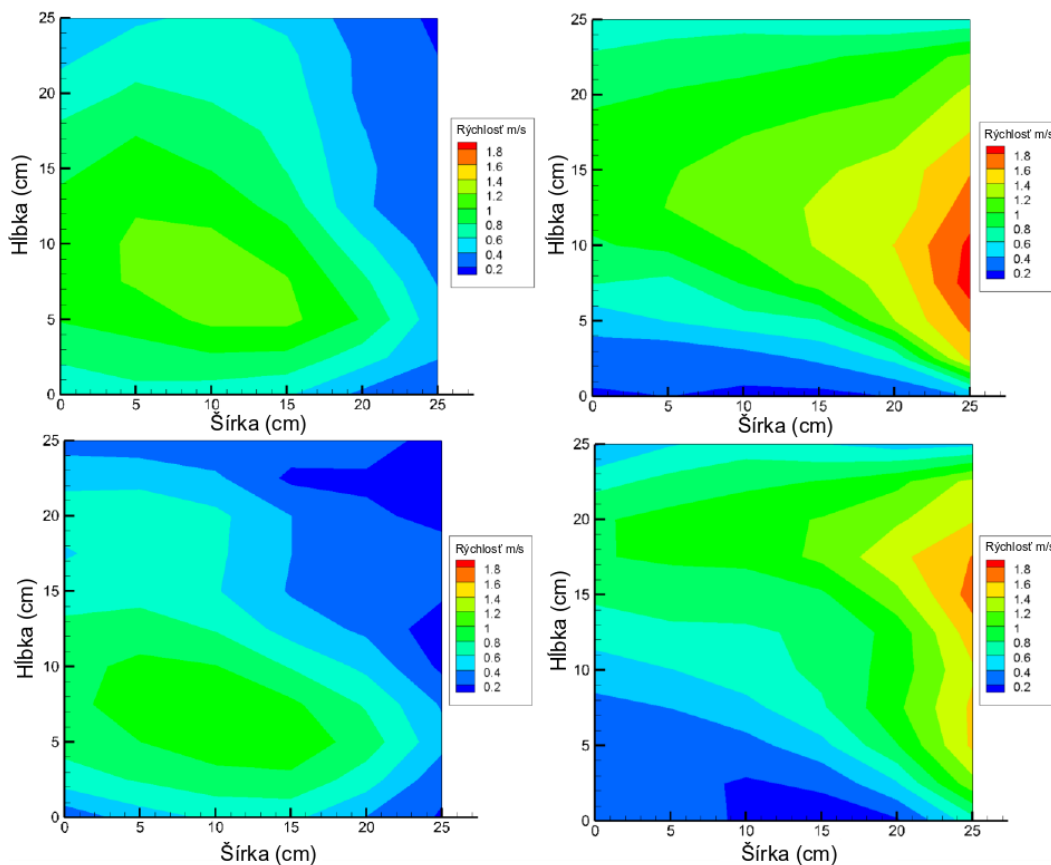
Philo [25] sa podobne zaoberal úpravou konštrukcie vstupných otvorov inertnej atmosféry do stavebnej komory tlačiarne Renishaw AM250 za použitia CFD simulácií a ich porovnaní pomocou merania rýchlosti prúdenia metódou termickej anemometrie. Pri simuláciách a testovaní najvhodnejšieho turbulentného modelu došli k záveru, že danému účelu najviac vyhovuje turbulentný model  $\kappa$ - $\epsilon$  spolu s Menter-Lechner stenou. Vstup inertnej atmosféry bol definovaný pomocou hmotnostného prietoku na začiatku prívodnej trubky, ktorý bol vypočítaný z hodnôt objemového prietoku uzavretého cirkulačného okruhu s nastavenou hodnotou na 15 m<sup>3</sup>/hod. Výstup bol definovaný pomocou zachovania hmoty v uzavretom cirkulačnom okruhu. Podmienky použité pre simulácie znázorňuje (Tab. 2-4) [25].

Tab. 2-4 Podmienky nastavené pre simulácie [25].

Vlastnosť	Hodnota	Zdroj
Hustota	1,225 kg·m <sup>-3</sup>	ANSYS
Dynamická viskozita	1,789·10 <sup>-5</sup> kg·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup>	ANSYS
Priemer jednej trysky	12 mm	Vypočítané
Maximálna rýchlosť pre jednu trysku	5 m·s <sup>-1</sup>	Vypočítané
Reynoldsove číslo	4108	Vypočítané
Hmotnostný prietok	0,0051 kg·s <sup>-1</sup>	Vypočítané

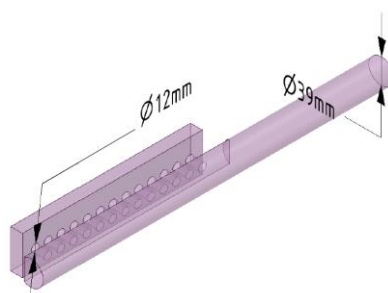


Simulácie boli porovnávané s experimentálnymi meraniami, ktoré boli realizované pomocou metódy termickej anemometrie. Na (Obr. 2-28) je vidieť, že simulačné modely sú porovnateľné s nameranými hodnotami [25].



Obr. 2-28 Experimentálne meranie pomocou termickej anemometrie oproti výsledkom z CFD simulácií, vo vrchnej časti sú experimentálne namerané kontúry rýchlosti, v spodnej časti sú výsledky CFD simulácií, na ľavej strane je zobrazená spodná rovina nachádzajúca sa 3 mm nad stavebným povrchom, na pravej strane je vertikálna rovina prechádzajúca stredom vstupu [25].

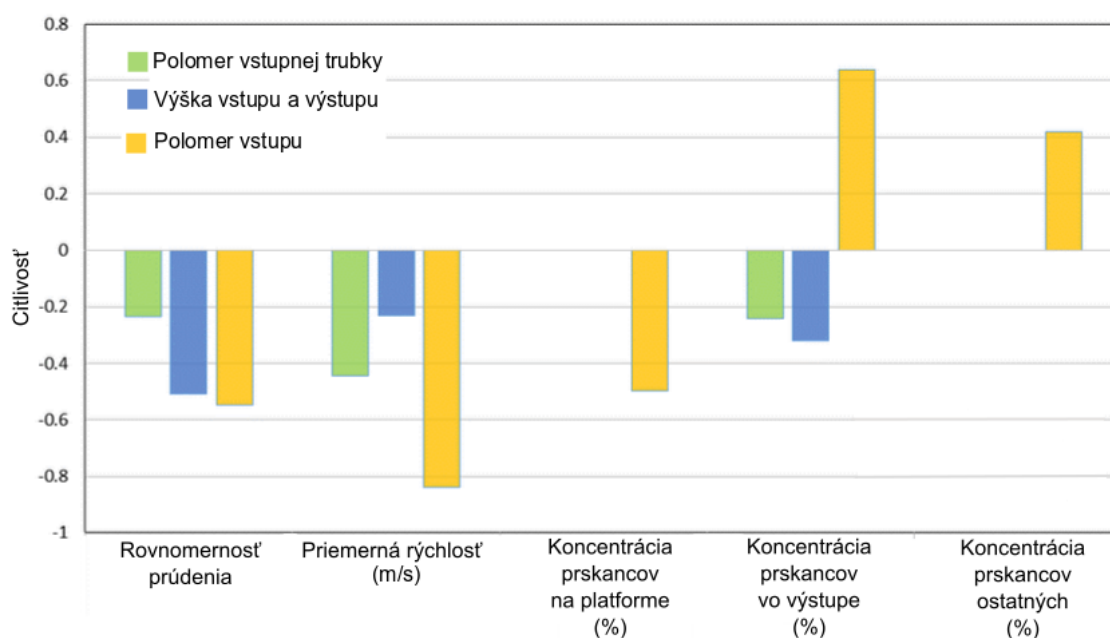
Úprava cirkulačného okruhu pozostávala v tomto prípade z viacerých jednoduchých úprav, kedy sa postupnými iteráciami dospelo k finálnemu výsledku. Bolo preskúmaných niekoľko vstupných parametrov, ktoré majú vplyv na prúdenie a to priemer vstupného otvoru, priemer vstupnej trubky, výška vstupov a výstupov inertnej atmosféry nad stavebnou rovinou. Vstupná časť zo vstupnými otvormi je znázornená na (Obr. 2-29).



Obr. 2-29 Geometria vstupných otvorov [25].

Na zlepšenie rovnomernosti prúdenia bolo vytvorených 30 konštrukčných bodov použitých na analyzovanie vplyvu spojenia vstupných parametrov s výstupnými. Priemer vstupnej trubky bol nastavený v intervale 15,25 mm až 29,75 mm a priemer vstupných otvorov bol nastavený od 3,10 mm až 8,9 mm. Na vyhodnotenie bol použitý Spearmanov korelačný koeficient.

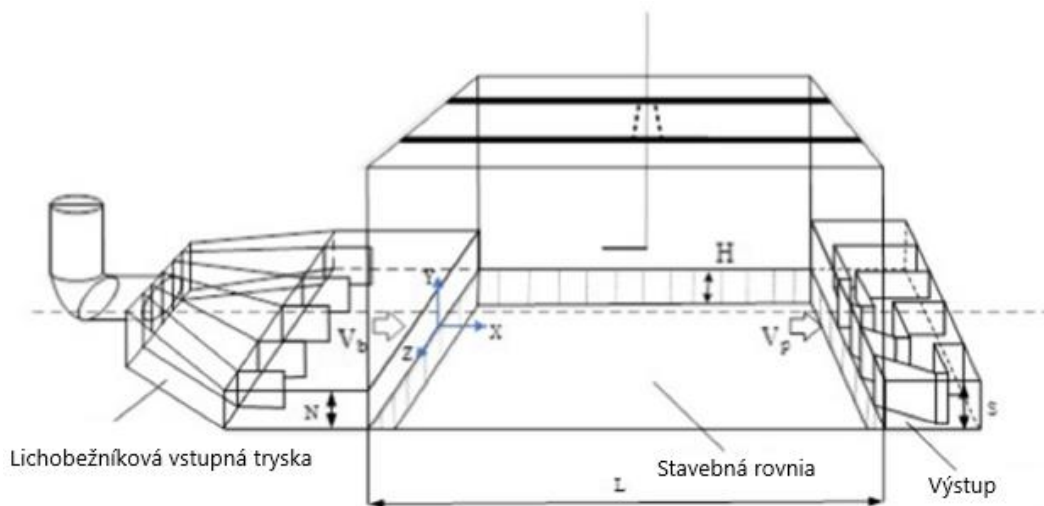
Z výsledkov (viď Obr. 2-30) je zreteľné, že rastúci priemer trubky má nepatrný negatívny efekt na rovnomernosť prúdenia a priemernú rýchlosť prúdenia. Zväčšenie priemeru vstupnej trubky má negatívny efekt na množstvo odstránených splodín zo stavebnej komory. Naopak zväčšením priemeru vstupných otvorov sa znižuje koncentrácia splodín na procesnej ploche, aj keď na druhú stranu sa zvyšuje koncentrácia splodín vo výstupe. Zvýšenie výšky vstupu a výstupu redukuje rovnomernosť prúdenia a dochádza k lokálnemu zvyšovaniu rýchlosti prúdenia, čo je nežiadúci efekt a taktiež má negatívny vplyv na odstraňovanie splodín cez výstup [25].



Obr. 2-30 Porovnanie efektu vstupných parametrov na výstupné parametre [25].

Zo získaných dát vyplýva, že na efektívnejšie odstraňovanie splodín a zlepšenie rovnomernosti prúdenia, ktoré je dôležité pre homogenitu súčiastky, je potrebné zmenšiť priemer vstupnej trubky a znížiť výšku vstupu a výstupu nad stavebnou rovinou. Rovnako je možné variovať s priemerom vstupných otvorov [25].

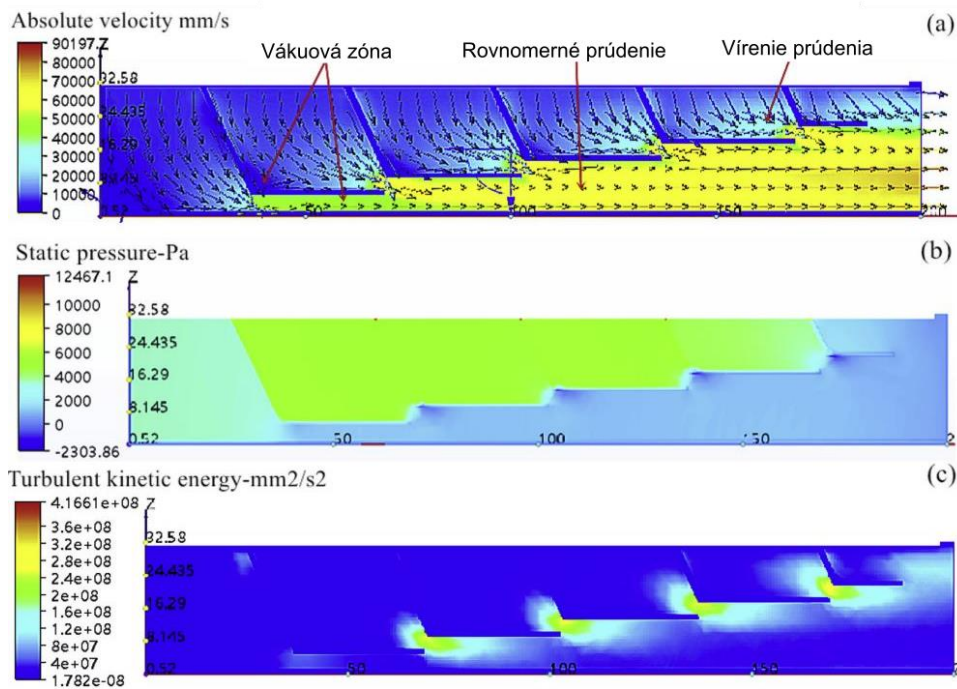
Wang [26] sa zaoberal zlepšením rovnomernosti prúdenia naprieč stavebnou komorou pomocou úprav geometrie vstupných otvorov, šírky výstupu a vzdialenosti vstupu od stavebnej roviny (viď Obr. 2-31).



Obr. 2-31 Geometria stavebnej komory [26].

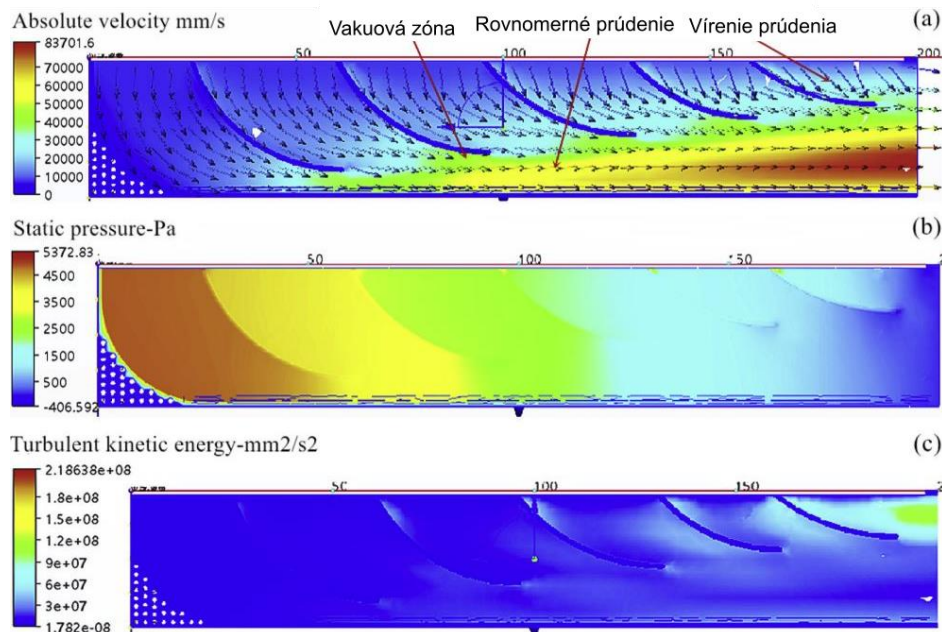
K úpravám využíval simulácie a experimentálne meranie. Došli k záverom, že zmenšenie šírky lichobežníkového vstupu, spôsobuje relatívne vysokú nestabilitu a znižuje rovnomernosť prúdenia. Naopak zmenšenie šírky výstupu viedlo k zlepšeniu prúdenia medzi výstupom a vstupom. Táto úprava mala za následok zachovanie rovnomernosti prúdenia v stavebnej komore a okrem toho sa zlepšil aj rýchlostný profil tak, že prúdenie nenarušovalo nanesenú vrstvu kovového prášku [26].

Guoqing [27] zameriaval výskum na zlepšenie konštrukcie výstupu inertnej atmosféry s cieľom zlepšiť odvod splodín zo stavebnej komory. K úpravám využíval CFD simulácie prúdenia, kde na základe vektorov rýchlosti a tlaku navrhol úpravu vodiacich lamiel. Simuláciou pôvodného riešenia poukázal na miesta s veľkým tlakovým gradientom (viď Obr. 2-32 (b)), v ktorých môže dochádzať k víreniu prúdenia a jeho recirkulácii. Príčinu veľkého tlakového gradientu identifikoval ako nesprávne nastavenie uhlu vodiacich lamiel a malú vzdialenosť medzi lamelami.



Obr. 2-32 Simulácia prúdenia v pôvodnom výstupe: a) rýchlosť prúdenia, b) statický tlak, c) rozloženie turbulencií [27].

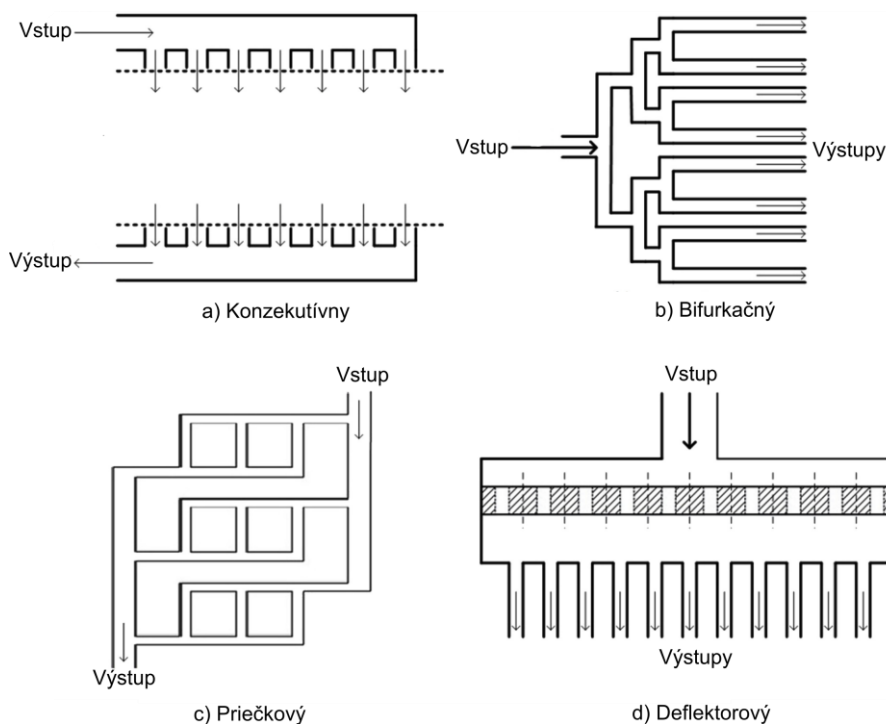
Pri modifikácii výstupu bol nastavený uhol medzi lamelami (zo  $115^\circ$  v pôvodnej konfigurácii) na meniaci sa uhol zo  $140^\circ$  až do  $160^\circ$ , upravená bola aj vzdialenosť medzi lamelami v rozstupe od 10 mm do 15 mm. Simulácia výslednej konfigurácie je znázornená na (Obr. 2-33), kde nižšia turbulentná kinetická energia naznačuje zlepšenie prúdenia [27].



Obr. 2-33 Simulácia prúdenia v upravenom výstupe: a) rýchlosť prúdenia; b) statický tlak; c) rozloženie turbulencií [27].

## 2.12 Distribúcia prúdenia

Rovnomerné rozdelenie prúdenia tvorí základný problém pri mnohých konštruktérskych úlohách. Cieľom distribútorov prúdenia je rozdeliť jeden prúd na dve a viac vetiev čo najrovnomernejšie. Konvenčne používané paralelné distribútor prúdenia je možné rozdeliť na konzekutívne, bifurkačné, priečkové a deflektorové (viď Obr. 2-34) [28], [29].

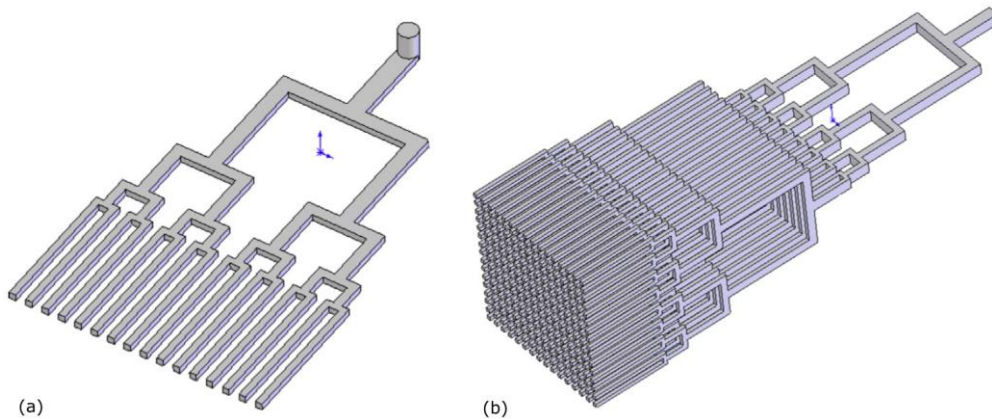


Obr. 2-34 Rozdielne typy paralelných viackanálikových distribútorov prúdenia: a) Konzekutívny, b) Bifurkačný, c) Priečkový, d) Deflektorový [29].

Konzekutívny distribútor prúdenia pozostáva z viacerých vstupných kanálikov, cez ktoré prúdi daná tekutina (viď Obr. 2-34 a)). Tento typ je vhodný najmä na použitie pri nízkych Reynoldsových číslach. Pri navýšení Reynoldsovho čísla dochádza k nerovnomernému rozdeľovaniu prúdenia cez kanáliky. Práve preto sa využívajú zošíkmené a schodovité tvary prírodného potrubia, ktoré majú za úlohu eliminovať nerovnomerné rozdeľovanie prúdenia [29].

Bifurkačný distribútor prúdenia je tvorený stromovou štruktúrou, kde kanáliky na výstupe majú obvykle najväčšiu dĺžku (Obr. 2-34 b)). Je vhodný najmä v prípadoch, kde nedochádza k rozmerovým zmenám na kanálikoch. Zároveň je to jediný koncept, kde nedochádza k zmene distribúcie prúdenia pre rozdielne prietoky pri vysokých Reynoldsových číslach. V prípade vysokého počtu výstupných kanálikov zvyčajne dochádza k vyšším tlakovým stratám z dôvodu veľkého počtu záhybov. Z čoho vyplýva, nevhodnosť pre prípady, kde sa vyžadujú nízke tlakové straty [28]. Aby bolo možné predísť nerovnomernému rozdeľovaniu prúdenia a náhlym zmenám smeru, tak daný koncept vyžaduje veľký zástavbový priestor [29].

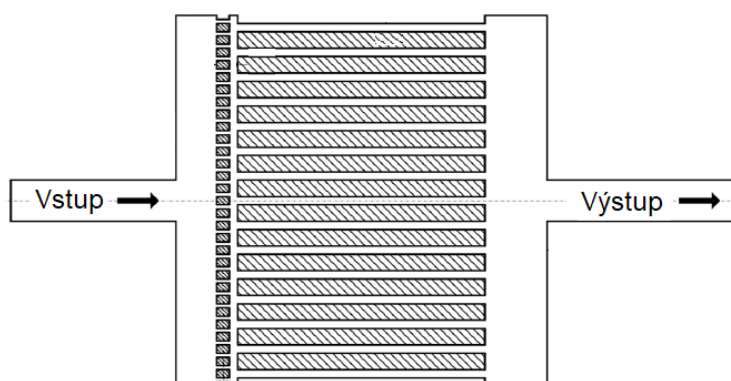
Pri rozdeľovaní prúdenia z jedného prúdu na dva pomocou bifurkačného distribútora, je rovnomernosť v jednotlivých vetvách závislá na rovnomernosti prúdenia v prívodnej trubke. Pokiaľ je profil v prívodnej trubke nerovnomerný, tak dôjde k rozdeleniu prúdenia na dve vetvy s rozdielnymi prietokmi. Preto je dôležité vždy zaručiť symetrický profil po každom rozdelení v čo najkratšej možnej dĺžke [30]. Bejan [31] sa zaoberal vývojom stupňovitej štruktúry na dosiahnutie rovnomernej distribúcie prúdenia, ktorý vo svojej podstate tvoril bifurkačný distribútor prúdenia. Následné overenie a simulácie daného riešenia realizoval Fan [32], kde z výskumu vyplynulo, že k nerovnomernému rozdeľovaniu prúdenia dochádza vplyvom vstupu konkrétne vplyvom asymetrického rozloženia prúdenia.



Obr. 2-35 Bifurkačný distribútor prúdenia: a) 2D, b) 3D [30].

Priečkový („ladder-type“) distribútor je častejšie využívaný typ ako bifurkačný, pretože je možné použiť vyšší počet kanálikov v kompaktnom návrhu (Obr. 2-34 c)). No podobne ako v prípade bifurkačného distribútora je limitujúcim faktorom zástavbový priestor distribútora [29].

Pomocou deflektorového distribútora je možné dosiahnuť takmer rovnomerné rozdelenie na výstupoch (viď Obr. 2-35 d), Obr. 2-36). Daným typom distribútora sa zaoberal Wei [33], kde vo výskume stanovil vzťahy na výpočet šírky deflektorov. Limitujúcim v danom koncepte je fakt, že tento typ distribútora sa používa k distribúcii prúdenia, kedy je os prívodnej trubky rovnobežná s osou výstupných trubiek.



Obr. 2-36 Deflektorový distribútor prúdenia [33].

## 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE

### 3.1 Analýza problému

Napriek tomu, že výroba kovových súčiastok pomocou technológie SLM je čím ďalej tým viac rozšírená, stále sa objavujú problémy s vhodným nastavením procesných parametrov a podmienok ovplyvňujúcich proces výroby a kvalitu vyrobenej súčiastky. Jeden z parametrov, ktorý do značnej miery vplyva na kvalitu súčiastky je prúdenie inertnej atmosféry v stavebnej komore.

Najväčšie problémy s nedostatočným prúdením inertnej atmosféry v stavebnej komore sú zaznamenávané pri spracovaní materiálov na báze horčika. Pri ich tavení vzniká enormné množstvo kondenzátu a splodín, ktoré spôsobujú rozptyľovanie laserového lúča, čo môže mať za následok zníženie výslednej kvality súčiastky [34]. Primárnym problémom je vysoká koncentrácia kondenzátu a splodín v dráhe laserového lúča, spôsobená ich cirkuláciou v stavebnej komore, čo následne spôsobuje usádzanie kondenzátu a splodín na ochrannom skle laserového lúča. Ďalším problémom sú častice rozstrekované z miesta tavenia materiálu, ktoré následne kontaminujú práškové lôžko.

Problémom pri stavebnom procese je nerovnomerná rýchlosť prúdenia, ktorá spôsobuje nerovnomerné odvádzanie kondenzátu a splodín čo má za následok rozptyľovanie laseru a teda vznik lokalít kde dochádza k zvýšeniu porozity súčiastky. Pri lokálne zníženej rýchlosti prúdenia dochádza zároveň aj k zvýšenej tvorbe rozstreknutých častíc z roztaveného prášku, ktoré sa následne usádzajú na práškovom lôžku a rovnako spôsobujú zvýšenie porozity súčiastky.

Najsignifikantnejší vplyv na rovnomernosť prúdenia tesne nad stavebnou platformou a teda aj na porozitu súčiastky má distribúcia inertnej atmosféry zo spodného vstupu. Nutnosť distribuovať prúdenie po celej šírke stavebnej platformy (278 mm) a malé zástavbové rozmery neumožňujú použitie bežných prístupov k riešeniu rozdeľovania prúdenia. Pri návrhu je teda problémom distribuovať prúdenie v daných zástavbových priestoroch po celej šírke stavebnej platformy rovnomerne.

## 3.2 Analýza a zhodnotenie rešerše

Z rešerše boli zistené všeobecné odporúčania na optimalizáciu prúdenia inertnej atmosféry, ktoré zahŕňajú nasledovné body. Prietok plynu by mal byť homogénny a nasmerovaný cez celý stavebný povrch rovnomerne. Rýchlosť prúdenia plynu by mala byť čo najvyššia, z dôvodu efektívnejšieho odstraňovania kondenzátu zo stavebnej roviny [2]. Toto tvrdenie potvrdzujú aj výsledky, ktoré publikoval Anwar [10], kde z výskumu plynie, že pri zvýšenej rýchlosti prúdenia dochádza k zvýšeniu akumulácie rozstreknutých častíc pri výstupe, čo indikuje nižšie množstvo častíc na stavebnom povrchu. No na druhú stranu rýchlosť prúdenia nemôže byť príliš vysoká, pretože by mohlo dochádzať k unášaniu nanoseného kovového prášku prúdom plynu ešte pred samotným procesom tavenia. Prúdenie plynu by malo byť usmernené tak, aby bolo v tesnej blízkosti k stavebnému povrchu, a aby inertný plyn zabránil interakcii laseru s vedľajšími produktami. Taktiež je potrebné redukovať vznik vírov [2].

Podľa výskumu ktorý publikoval Philo [25], má na charakter rýchlostného poľa zásadný vplyv niekoľko parametrov. Rastúci priemer prívodnej trubky do distribútora má nepatrne negatívny efekt na rovnomernosť prúdenia, priemernú rýchlosť prúdenia a množstvo odstránených splodín zo stavebnej komory. Naopak zväčšením priemeru výstupných otvorov vstupného distribútora sa znižuje koncentrácia splodín na procesnej ploche. Zvýšenie výšky vstupu a výstupu redukuje rovnomernosť prúdenia a dochádza k lokálnemu zvyšovaniu rýchlosti prúdenia, čo je nežiadúci efekt, a taktiež má negatívny vplyv na odstraňovanie splodín cez výstup. Z výskumu vyplýva, že na efektívnejšie odstraňovanie splodín a zlepšenie rovnomernosti prúdenia, ktoré je dôležité pre rovnomernú porozitu súčiastky, je potrebné zmenšiť priemer vstupnej trubky a znížiť výšku vstupu nad stavebnou rovinou. Tieto závery boli vyhodnocované pre daný konkrétny stroj SLM a preto ich nie je možné všeobecne aplikovať na iné stroje.

Keďže koncept stavebnej komory svojím usporiadaním prvkov nedovoľuje návrh rozdielneho systému odvodu splodín, tak je nutné modifikovať súčasné riešenie. Aby bolo možné zrovnomeniť prúdenie, tak pri návrhu nových dielov budú potrebné CFD simulácie.

Na overenie simulačných modelov je potrebné experimentálne meranie rýchlosti prúdenia. Najvhodnejšie pre daný účel je použitie termického anemometra, ktorý funguje na princípe ochladzovania žhavého drôtu prúdiacou tekutinou [35]. Výhoda tejto metódy pri porovnaní s metódou PIV (particle image velocimetry) spočíva v možnosti merania rýchlosti prúdenia bez potreby používania tuhých častíc, ktoré by následne spôsobili kontamináciu recirkulačného systému, čo by predstavovalo problém pri čistení celého stroja.



Ďalšia časť rešeršnej časti bola venovaná výberu vhodného turbulentného modelu na simulácie tak, aby bolo možné simulačný model zosúladiť s experimentálnym meraním. Model realizable  $\kappa$ - $\varepsilon$  vyšiel pre daný účel ako najvhodnejší, keďže jeho výsledky sa najviac blížili experimentálnemu meraniu.

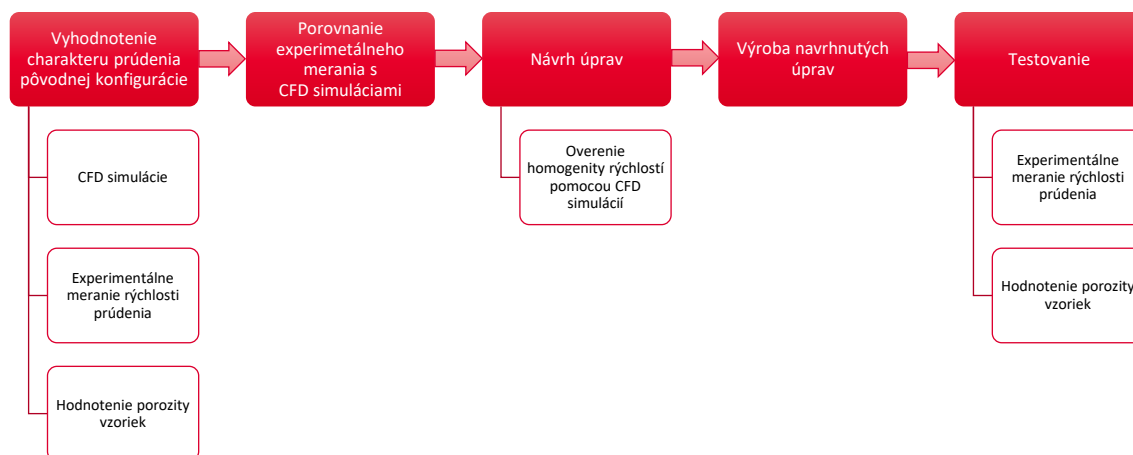
### 3.3 Podstata a ciele diplomovej práce

Cieľom diplomovej práce je zaistiť efektívny odvod kondenzátu a splodín zo stavebnej komory SLM tak, aby bola porozita súčiastky na celej stavebnej platforme čo najnižšia. K dielčím cieľom patrí analýza lokalít so zníženou rýchlosťou prúdenia, zistenie korelácie porozity a rýchlosti prúdenia, návrh možných variant úprav, konštrukcia a simulácia vybraného riešenia, realizácia úprav a experimentálne overenie dosiahnutých parametrov. Hlavným meraným parametrom je rýchlosť prúdenia, z ktorej budú vyhodnotené kontúry rýchlosti v stavebnej komore, ktoré sú následne korelované s porozitou testovacích vzoriek. Po úpravách by malo dôjsť k zníženiu fluktuácií rýchlosti z výstupných otvorov spodného distribútora o 15 % oproti pôvodnému riešeniu, čím bude dosiahnuté homogénnejšie rýchlostné pole nad stavebnou platformou, ktoré by malo zaručovať efektívnejší odvod kondenzátu a splodín čo by malo celkovo viesť k zníženiu porozity súčiastok.

## 4 KONCEPČNÉ RIEŠENIE

### 4.1 Popis riešenia

Zaistenie efektívnejšieho odvodu kondenzátu a splodín z objemu stavebnej komory bolo možné doceliť za pomoci niekoľkých úprav, ktoré sú popísané v nasledujúcich kapitolách. Prvky, ktoré priamo vplyvajú na charakter prúdenia a zároveň bola možná ich modifikácia sú vstupy, výstupy, prípadne pridanie výstupu a deflektorov prúdenia do cirkulačného okruhu. Návrh úprav pozostával z niekoľkých základných krokov. Prvý krok zahŕňal vyhodnotenie charakteru prúdenia v pôvodnej konfigurácii na základe výsledkov získaných z experimentálneho merania rýchlosti prúdenia a simulačného modelu. Ďalším krokom bol test porozity vzoriek, ktoré boli následne korelované s experimentálnym meraním rýchlosti prúdenia. Na základe vyhodnotenia lokalít so zníženou rýchlosťou prúdenia boli navrhnuté koncepčné varianty. Vybraný koncepčný variant bol následne navrhnutý iteračným procesom za pomoci CFD simulácií. Nasledovala výroba vybraného riešenia a testovanie za pomoci hodnotenia porozity testovacích vzoriek a experimentálneho merania rýchlosti prúdenia a porovnania porozity vzoriek pred a po úpravách.



Obr. 4-1 Postup riešenia práce.

### 4.2 Analýza prúdenia pôvodnej konfigurácie stavebnej komory

K zhodnoteniu charakteru prúdenia v objeme stavebnej komory boli potrebné simulácie prúdenia a verifikačné experimentálne merania, na základe ktorých bolo možné vyhodnotiť lokality s nízkou rýchlosťou prúdenia a teda nedostatočným odvodom kondenzátu a splodín. V nasledujúcich kapitolách sú popísané prístupy k identifikovaniu týchto miest.

## 4.2.1 Experimentálne meranie rýchlosti prúdenia

Na overenie simulačných modelov prúdenia cirkulačného okruhu bolo potrebné zvoliť vhodnú metódu merania. Na základe rešeršnej časti bola zvolená metóda termickej anemometrie.

Cieľom experimentálneho merania bolo namerať rýchlosť prúdenia v jednotlivých bodoch z ktorých bolo následne vyhodnotené rýchlostné pole v najzásadnejších rovinách stavebnej komory. Jednalo sa o rovinu rovnobežnú so stavebnou platformou s ktorou bola následne možná korelácia rýchlostného poľa a porozity vzoriek a o vertikálnu rovinu, ktorá prechádza stredom stavebnej platformy, aby bolo možné identifikovať charakter prúdenia v objeme komory. Na meranie bol použitý multifunkčný prístroj Testo 435 spolu s termickou sondou (Testo 0635 1535) pre meranie rýchlosti prúdenia s teleskopom (max. 745 mm). Merací rozsah a presnosť sú uvedené v (Tab. 4-1). Rozsah rýchlostí v stavebnej komore sa mal na základe rešerše pohybovať maximálne do  $5,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  čo predstavuje vyhovujúcu hodnotu rýchlosti pre danú sondu.

Tab. 4-1 Technické parametre použitej sondy.

<b>Technické parametre sondy Testo 0635 1535</b>	
Merací rozsah	0 – $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Presnosť	$\pm(0.03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} + 4\% \text{ z nam.h.})$

Merací reťazec sa skladal zo statívu a redukcie v ktorej bola upevnená sonda. Súčasťou meracieho reťazca bol aj tesniaci element (Obr. 4-2), ktorý mal zamedzovať únikom vzduchu zo stavebnej komory počas merania.

Postup merania bol nasledovný. Po otvorení dvierok sa pomocou skrutiek M4 pripevní na prednú časť stavebnej komory plexisklo s otvormi pre vkladanie sondy. Meranie prebiehalo vždy v jednom bode pričom ostatné otvory boli v tom čase zaslepené. Meranie v danom bode prebiehalo vždy po ustálení prúdenia po dobu 10 sekúnd. Výslednú hodnotu v danom bode predstavuje priemerná hodnota za daný časový interval.

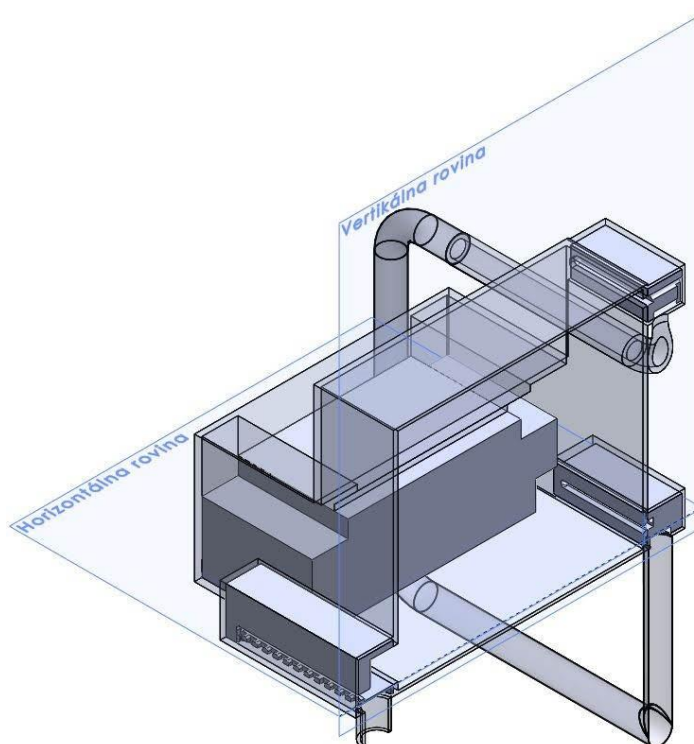
Meranie prebiehalo zo vzduchom, keďže prístroj je kalibrovaný na vzduch. Taktiež treba brať do úvahy, že použitie dusíku alebo argónu by mohlo predstavovať riziko, keďže by pri zmene polohy sondy mohlo dochádzať k úniku plynov. Zmena obsahu kyslíka by následne mohla vnášať chybu do merania. Pri meraní bolo nutné zaslepiť senzory kyslíku a naplniť ich dusíkom, aby bolo možné spustiť pumpu cirkulačného okruhu. Pretože pri obsahu kyslíku 2 % a viac nie je možné pumpu spustiť.

Prvá séria experimentálnych meraní prebehla vo výške 42 mm nad stavebnou platformou. Jej cieľom bolo zistiť rozsah zachytenia rýchlostného poľa.

Druhá séria meraní prebehla vo výške 12 mm nad stavebnou platformou, kde sa očakávala vyššia úroveň zachytenia rýchlostného poľa a zároveň to bola minimálna výška v ktorej bolo možné uskutočniť meranie. Kontúry rýchlosti boli vyhodnocované v horizontálnej rovine 42 mm a 12 mm nad stavebnou platformou a vo vertikálnej rovine rovnobežnej s prednými dvierkami a zároveň prechádzajúcou stredom platformy (Obr. 4-3). Výsledky merania boli následne spracované v programe Matlab, kde boli vykreslené kontúry rýchlosti.



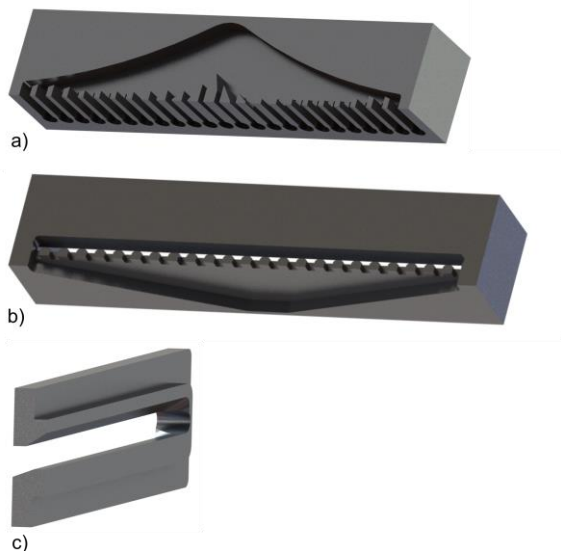
Obr. 4-2 Priebeh merania rýchlosti prúdenia, tesniaci element (červený).



Obr. 4-3 Stavebná komora v reze, znázornenie vertikálnej a horizontálnej roviny v ktorých prebiehali merania.

## 4.2.2 CFD simulácie pôvodnej konfigurácie

CFD simulácie zahŕňali niekoľko krokov. Prvým krokom bola tvorba geometrie, ktorá zahŕňala aj skenovanie najzložitejších dielov pomocou 3D skeneru ATOS. Následne boli naskenované diely reverzne namodelované. Jednalo sa o výstup a krytku vstupu. Sken vstupu bol prebraný z predchádzajúceho projektu (Obr. 4-4).

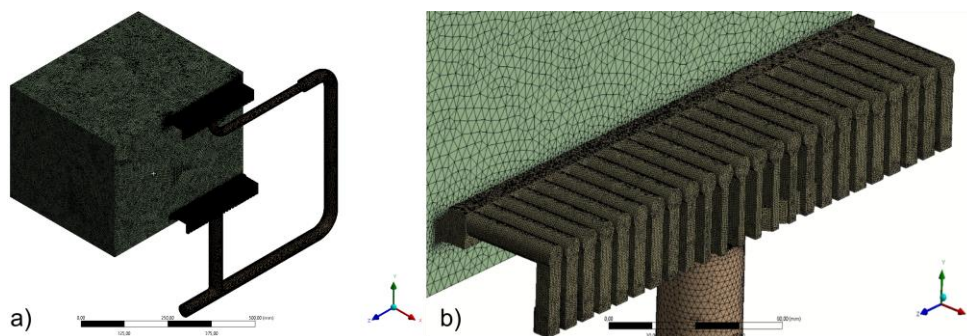


Obr. 4-4 Súčiastky, ktoré boli reverzne namodelované zo skenov: a) vstup inertnej atmosféry, b) výstup, c) krytka vstupu (v reze).

Ďalším krokom bolo vytvorenie negatívu komory, ktorý reprezentuje objem prúdiaceho média v simuláciách. Nasledovalo odstránenie malých hrán a zjednodušenie geometrie, aby bolo možné daný prípad nasimulovať.

### Výpočtová sieť

Tvorba výpočtovej siete pre simulácie prebiehala v desiatkach iterácií kedy sa postupne dospelo k finálnej výpočtovej sieti, ktorá bola tvorená štvorstennými s počtom prvkov 13 845 136 (vid' Obr. 4-5). Na steny bola použitá funkcia zjemnenia siete (inflation layer) v 2 vrstvách, ktorá je schopná zachytiť gradient rýchlostí, ktorý vzniká v blízkosti stien.



Obr. 4-5 Výpočtová sieť s 13 845 136 elementami: a) celá výpočtová sieť, b) detail výpočtovej siete vstupu.

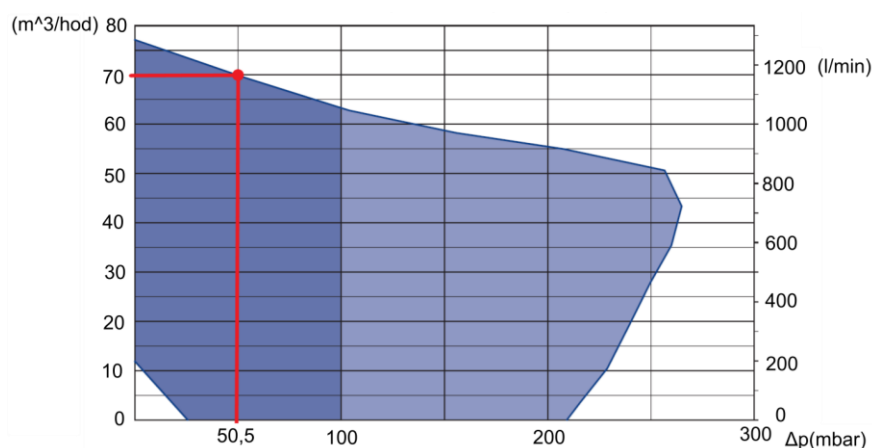
Pri tvorbe siete bolo sledované skosenie prvkov (skewness), ktoré má zásadný vplyv na konvergenciu a aj výsledok samotný.

### Okrajové podmienky

Voľba okrajových podmienok pre simulácie prebehla na základe známych hodnôt tlaku a závislosti prietoku na pretlaku pri 75 % výkone pumpy (vid' Tab. 4-2, Obr. 4-6). Pre simulácie bol použitý vzduch, keďže aj experimentálne merania prebiehali so vzduchom.

Tab. 4-2 Tlaky v cirkulačnom okruhu pri 75 % výkone pumpy [3].

Výkon pumpy (%)	Tlak (mbar)			
	V komore	Pred filtrom	Medzi filtrom a pumpou	Za pumpou
75	12,5	7,5	-32,5	18



Obr. 4-6 Charakteristika pumpy – závislosť pretlaku na prietoku pumpy [7].

Na vstup bola zadaná intenzita turbulencií vypočítaná na základe nasledujúcich vzťahov: ako prvé bolo vypočítané Reynoldsovo číslo:

$$Re_D = \frac{U_d D}{\nu} \quad (8)$$

$$D = \frac{4 \cdot S}{o} \quad (9)$$

$$Re_D = \frac{11,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 0,04 \text{ m}}{1,568 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}} = 28571 \quad (10)$$

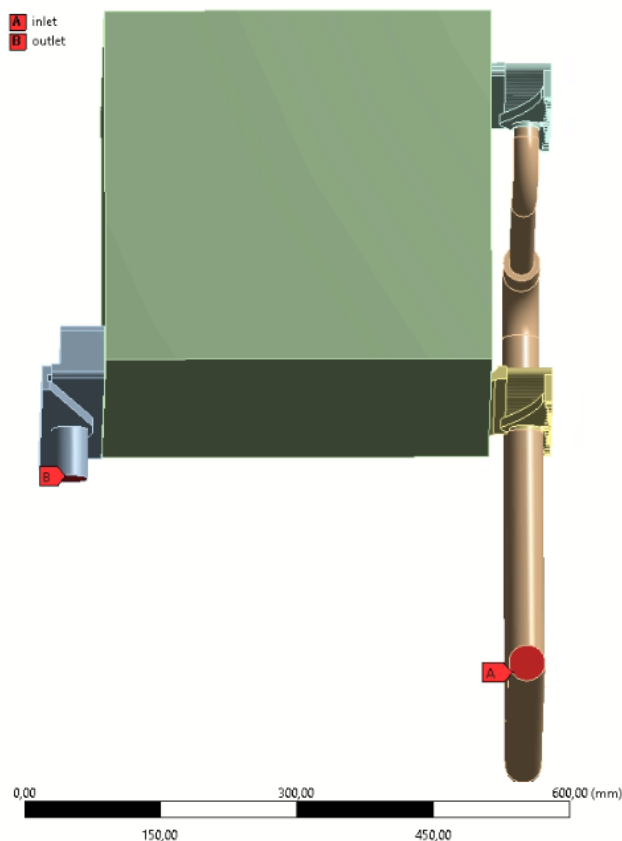
kde je  $U_d$  stredná hodnota rýchlosti v danom priereze v m,  $D$  je hydraulický priemer v m,  $\nu$  je kinematická viskozita  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $S$  je obsah plochy na ktorú je zadávaná okrajová podmienka v  $\text{m}^2$ ,  $O$  je obvod plochy na ktorú je zadávaná okrajová podmienka v m.

Ďalším krokom bol výpočet intenzity turbulencií, ktorá je daná nasledovným vzťahom [19]:

$$I = 0,16 \cdot (Re_D)^{-\frac{1}{8}} = 0,16 \cdot (28571)^{-\frac{1}{8}} = 0,044 \quad (11)$$

Na základe uvedeného výpočtu bola zvolená hodnota turbulencií na vstupe aj výstupe 4 %. Vyššie uvedené vzťahy boli použité pre všetky nasledujúce simulácie.

Na vstup bola zadaná okrajová podmienka (velocity inlet) s rýchlosťou  $11,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a na výstup bolo zadaný tlak  $-1050 \text{ Pa}$  ako podmienka (pressure outlet), aby bol zaručený tlakový rozdiel medzi vstupom a výstupom. Všetky okrajové podmienky zvolené pre simuláciu sú uvedené v (Tab. 4-3) a na (Obr. 4-7).

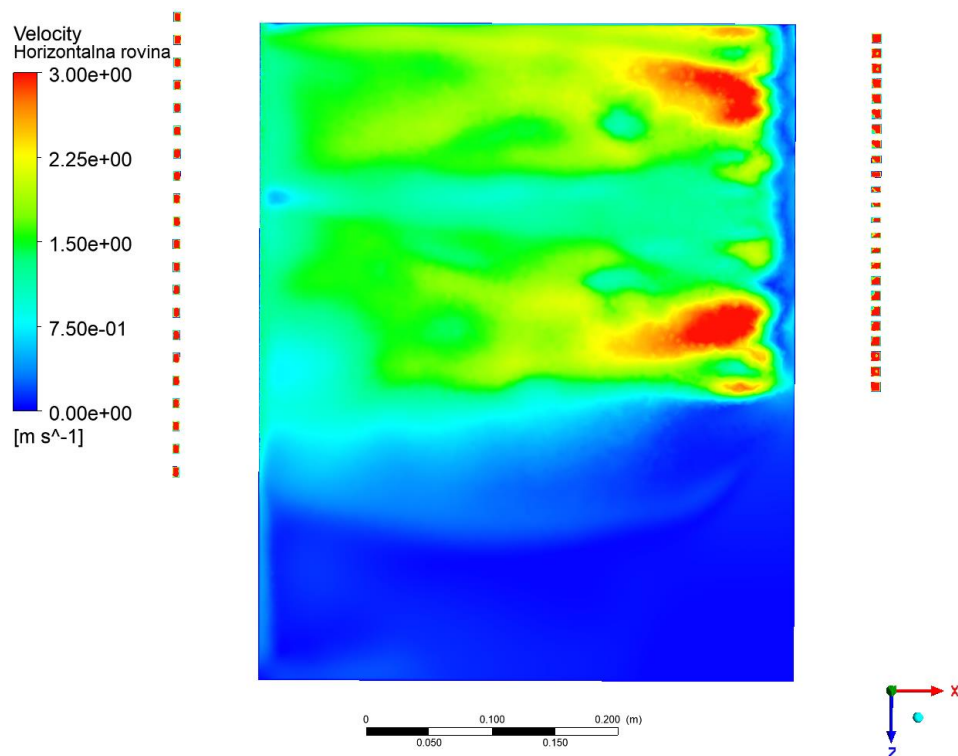


Obr. 4-7 Nastavenie okrajových podmienok.

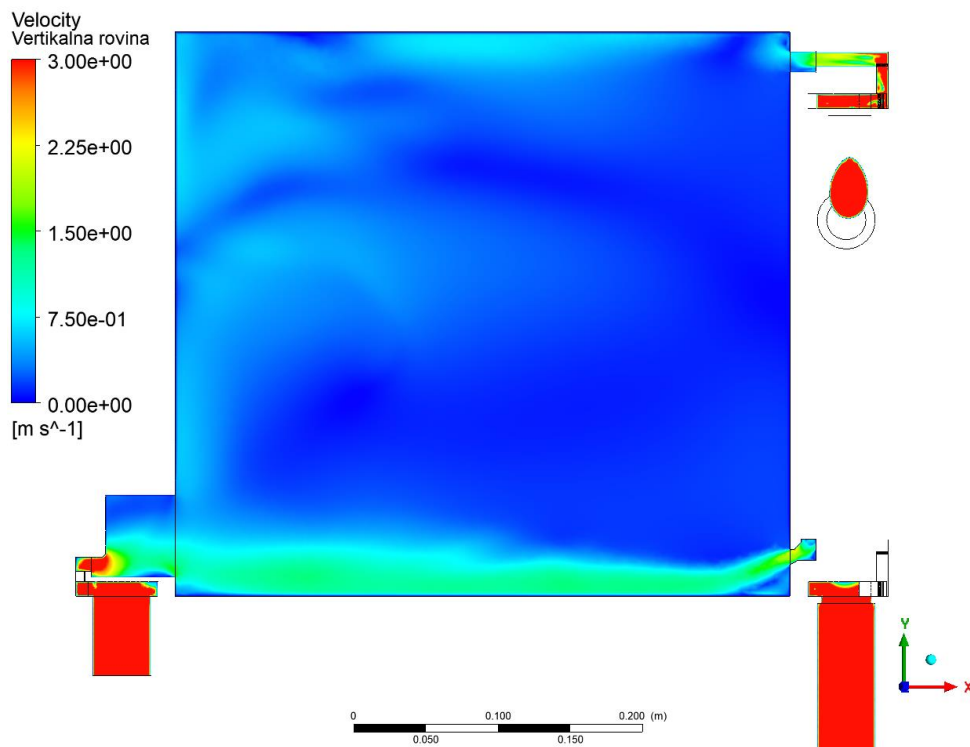
Tab. 4-3 Okrajové podmienky použité pre simuláciu.

<b>Okrajové podmienky pre 75 % výkonu pumpy</b>	
Ustálené prúdenie (Steady state)	–
Pressure based solver	–
Nestlačiteľné prúdenie	–
Vstupná rýchlosť (Velocity inlet)	$11,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Výstupný tlak (Pressure outlet)	$-1050 \text{ Pa}$
Turbulentný model	$k-\epsilon$ realizable
Stenová funkcia	Scalable wall function
Prúdiace médium	vzduch

Simulácia bola považovaná za skonvergovanú, keď došlo k poklesu rezidií pod hodnotu  $1 \cdot 10^{-3}$ . Výsledky CFD simulácií pôvodnej konfigurácie sú zobrazené na (Obr. 4-8 a Obr. 4-9).



Obr. 4-8 Kontúry rýchlostí z CFD simulácií v horizontálnej rovine v pôvodnej konfigurácii stavebnej komory.

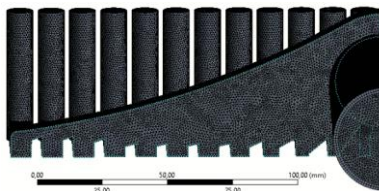


Obr. 4-9 Kontúry rýchlostí z CFD simulácií vo vertikálnej rovine v pôvodnej konfigurácii stavebnej komory.



### 4.2.3 CFD simulácia spodného vstupu

Bola realizovaná na porovnanie fluktuácií rýchlostí pred a po úpravách cirkulačného okruhu. Pri simulácii bola využitá symetria. Výpočtová sieť použitá pre simulácie (viď Obr. 4-10).



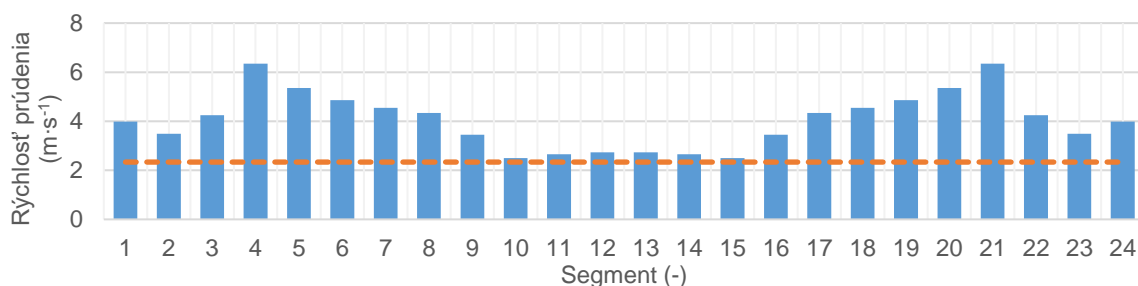
Obr. 4-10 Výpočtová sieť s využitím symetrie.

Okrajové podmienky použité pre simuláciu (viď Tab. 4-4). Pričom vstupná rýchlosť bola získaná zo simulácie pôvodnej konfigurácie. Konvergencia výsledku bola uvažovaná keď došlo k poklesu reziduí pod hodnotu  $1 \cdot 10^{-3}$ .

Tab. 4-4 Okrajové podmienky použité pre simuláciu.

Okrajové podmienky pre 75 % výkonu pumpy	
Ustálené prúdenie (Steady state)	–
Pressure based solver	–
Nestlačiteľné prúdenie	–
Vstupná rýchlosť (Velocity inlet)	6,1 m·s <sup>-1</sup>
Výstupný tlak (Pressure outlet)	0 Pa
Turbulentný model	k-ε realizable
Stenová funkcia	Scalable wall function
Prúdiace médium	vzduch

Výsledky simulácie (viď Obr. 4-11) ukazujú, že fluktuácie rýchlostí v jednotlivých výstupoch sa pohybujú do 3,84 m·s<sup>-1</sup>.

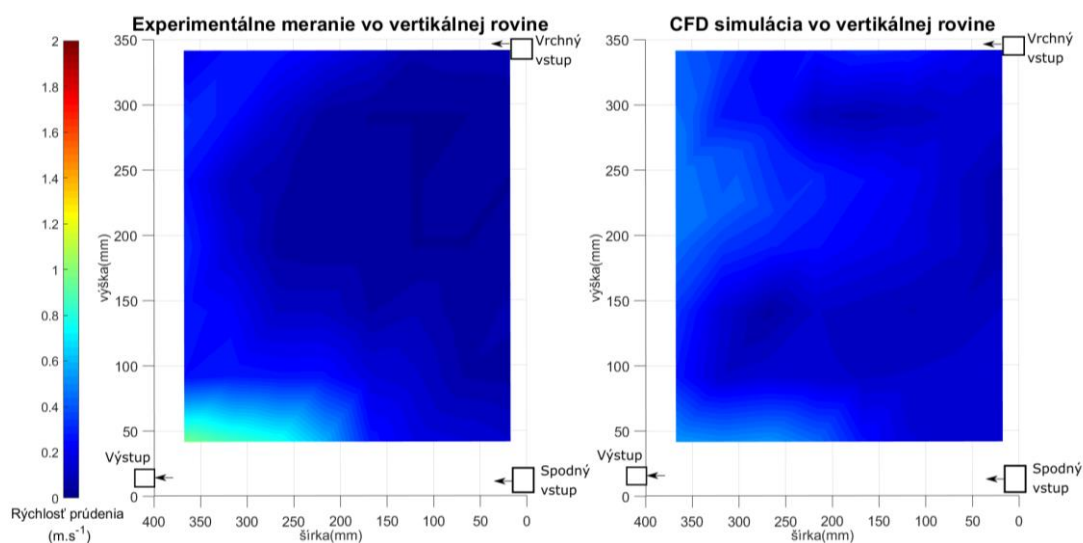


Obr. 4-11 Rozloženie priemernej rýchlosti prúdenia na segmentoch distribútora.

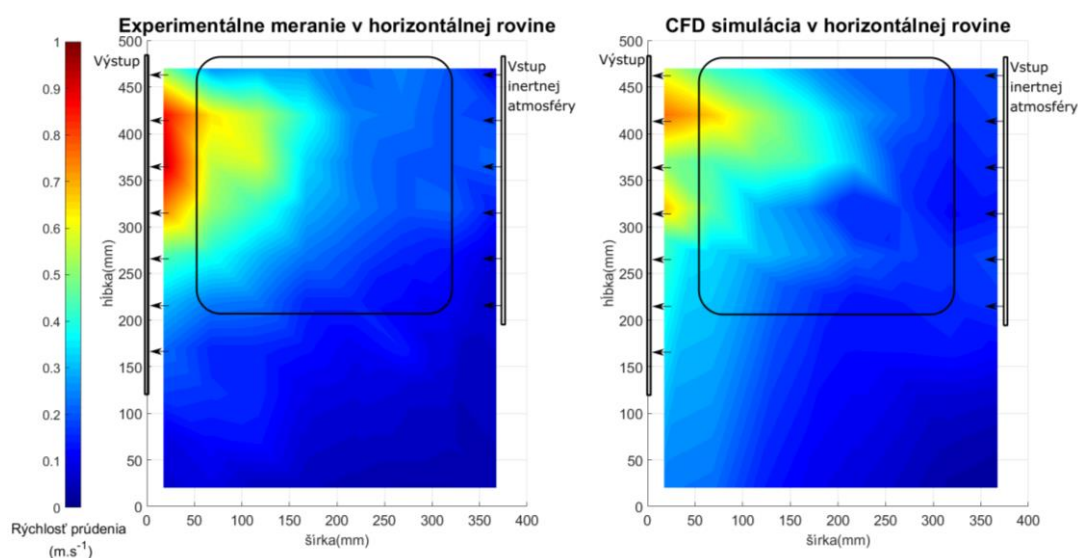
## 4.2.4 Vyhodnotenie experimentálneho merania a CFD simulácií

Prvá séria experimentálnych meraní prebehla primárne z dôvodu zistenia či je možné zachytenie rýchlostného poľa v stavebnej komore. Meranie bolo realizované v horizontálnej rovine 42 mm nad stavebnou rovinou v 56 bodoch a vo vertikálnej rovine, ktorá prechádza stredom vstupnej trubky v 110 bodoch.

Ako je vidieť z vyhodnotenia merania vo vertikálnej rovine (Obr. 4-12), tak rýchlosti v danej oblasti sa pohybovali na veľmi nízkej úrovni (do  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Taktiež v danej oblasti prúdenie nie je usmernené a dochádza k jeho recirkulácii, čo mohlo spôsobiť odchýlky pri meraní, keďže anemometer je do určitej miery citlivý aj na natočenie sondy voči prúdnicí.



Obr. 4-12 Kontúry rýchlosti vo vertikálnej rovine (pohľad spredu na stavebnú komoru), porovnanie experimentálneho merania a CFD simulácií.



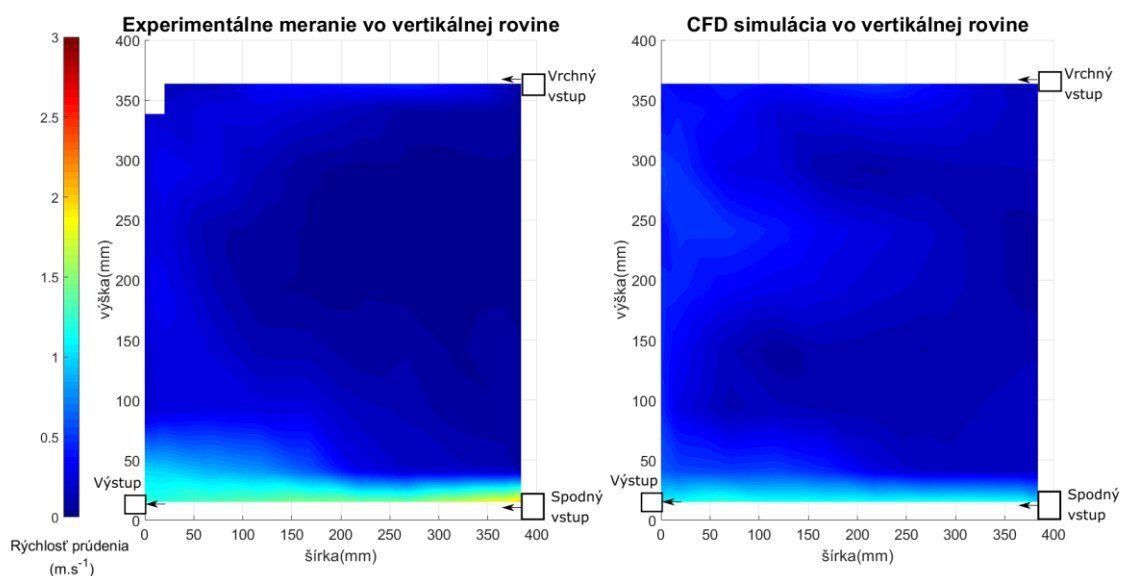
Obr. 4-13 Kontúry rýchlosti v horizontálnej rovine 42 mm vysoko (pohľad zhora na stavebnú komoru), porovnanie experimentálneho merania a CFD simulácií (stavebná platforma naznačená rámečkom).

Z vyhodnotení v horizontálnej rovine (Obr. 4-13) vyplynulo, že v danej výške nad stavebnou platformou je možné zachytiť iba minimálny rozsah rýchlostného poľa do  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , ktoré nie je možné následne korelovať s porozitou.

Z experimentálnych meraní a CFD simulácií vyplynulo, že rýchlostné pole je možné pomocou danej metódy zaznamenať, ale v nasledujúcom meraní bolo nutné posunúť horizontálnu vyhodnocovaciu rovinu čo najnižšie, aby bolo možné zaznamenať rýchlostné pole v čo najväčšom spektre tesne nad stavebnou rovinou. Rovnako bolo potrebné rozšíriť oblasť vyhodnocovania vo vertikálnej rovine.

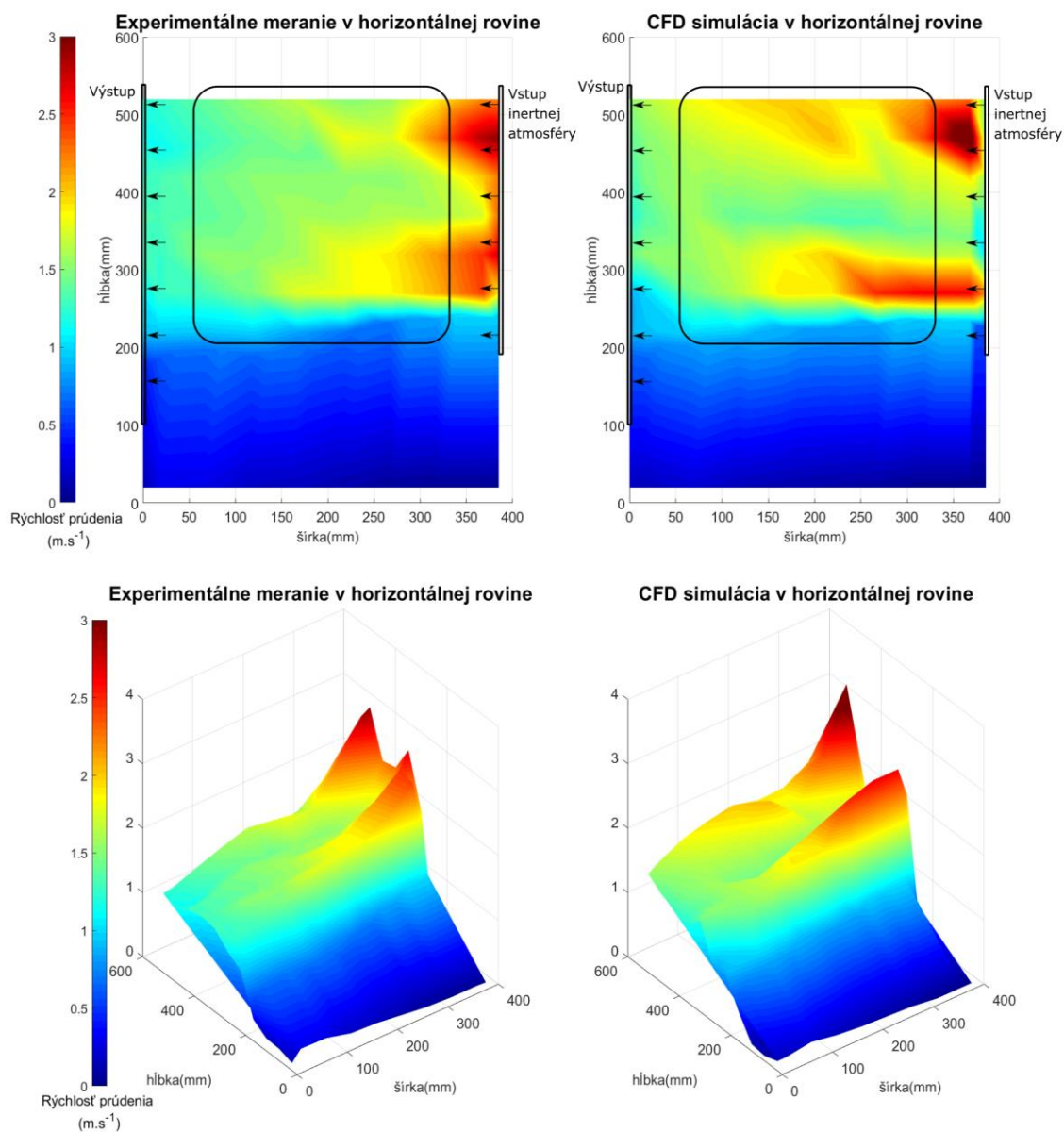
Druhá séria meraní metódou termálnej anemometrie prebehla z dôvodu nutnosti rozšírenia mapovaného rýchlostného poľa v prierezoch stavebnej komory. Pri meraní vo vertikálnej rovine došlo k rozšíreniu mapovaného poľa až na limit, kde bolo možné meranie zrealizovať. Došlo k navýšeniu meraných bodov z 56 na 90 bodov. Porovnanie experimentálneho merania a CFD simulácií je znázornené na (Obr. 4-14).

Z výsledkov na (Obr. 4-14) je viditeľná zhoda v spodnej časti stavebnej komory, kde sa rýchlosti pohybujú rádovo vyššie ako v iných častiach a prúdenie je tu usmernené. Mierne odlišnosti v objeme stavebnej komory sú spôsobené primárne neusmerneným prúdením vo vrchnej časti komory.



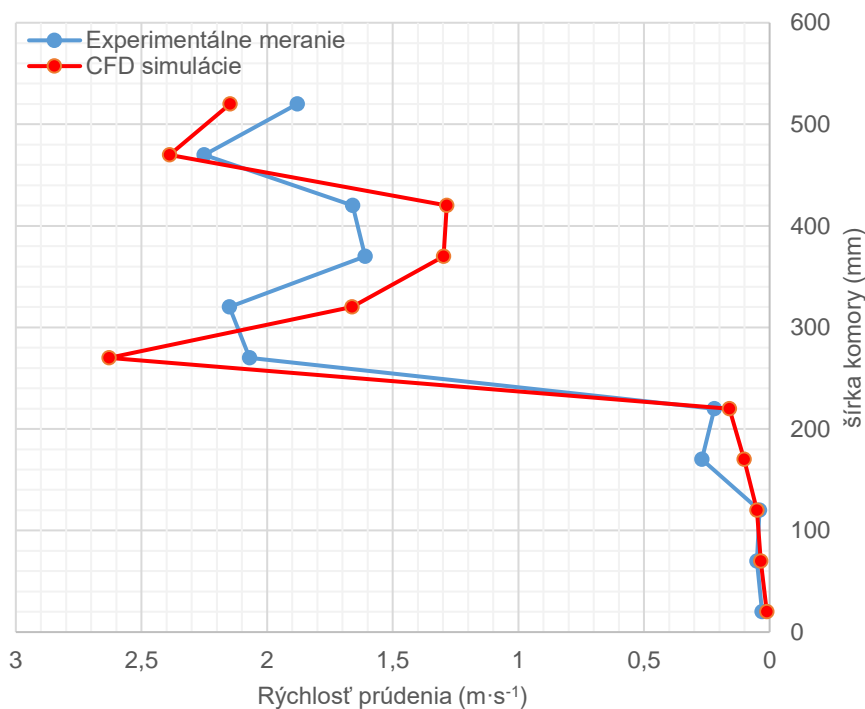
Obr. 4-14 Kontúry rýchlosti vo vertikálnej rovine (pohľad spredu na stavebnú komoru), porovnanie experimentálneho merania a CFD simulácií.

V druhej sérii meraní prebehlo aj meranie v horizontálnej rovine vo výške 12 mm nad stavebnou rovinou v 110 bodoch. Vyhodnotenie kontúr rýchlosti v danej rovine môžete vidieť na (Obr. 4-15). Stavebná platforma (viď Obr. 4-15) predstavuje oblasť na ktorú bola upriamená pozornosť, keďže by mala mať najväčší vplyv na rovnomernú kvalitu súčiastky. Z kontúr rýchlosti je viditeľný prepád rýchlostí v centrálnej časti vstupu inertnej atmosféry pri oboch vyhodnocovacích metódach.



Obr. 4-15 Kontúry rýchlosti v horizontálnej rovine 12 mm nad stavebnou platformou (pohľad zhora na stavebnú komoru), porovnanie experimentálneho merania a CFD simulácií (stavebná platforma naznačená rámčekom).

Z merania a CFD simulácií bolo možné vyhodnotiť aj rýchlostný profil v horizontálnej rovine naprieč komorou (viď Obr. 4-16). Rýchlostný profil bol vyhodnocovaný v oblasti, kde sa nachádza hrana stavebnej platformy vľavo od vstupu. V tejto lokalite dochádzalo k najväčšiemu rozdielu v rýchlostiach. Pri experimentálnom meraní sa jedná o prepád rýchlosti prúdenia na hodnotu  $1,61 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a pri CFD simuláciách nastal prepád na hodnotu  $1,28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .



Obr. 4-16 Rýchlostný profil: porovnanie experimentálneho merania s CFD simuláciami na začiatku stavebnej platformy (vpravo sa nachádza vstup a vľavo výstup).

Porovnaním CFD simulácií s experimentálnym meraním metódou termálnej anemometrie vyplýva, že simulačný model sa značne zhoduje s experimentálnym meraním. Odchýlky, ktoré nastávajú v niektorých oblastiach môžu byť pripísané buď nepresnosti anemometra alebo nepresnostiam vo výpočtovom modeli, ako napríklad nepresnosti v geometrii, prípadne použitom výpočtovom modeli.

Z vyhodnotenia vyplýva, že bude potrebné zvýšenie rýchlosti v centrálnej časti vstupu inertnej atmosféry, aby bolo rozloženie rýchlostí naprieč stavebnou rovinou rovnomernejšie. A vo vrchnej časti stavebnej komory bude potrebné usmernenie prúdenia, aby nedochádzalo k zanášaniam ochranného skla laseru.

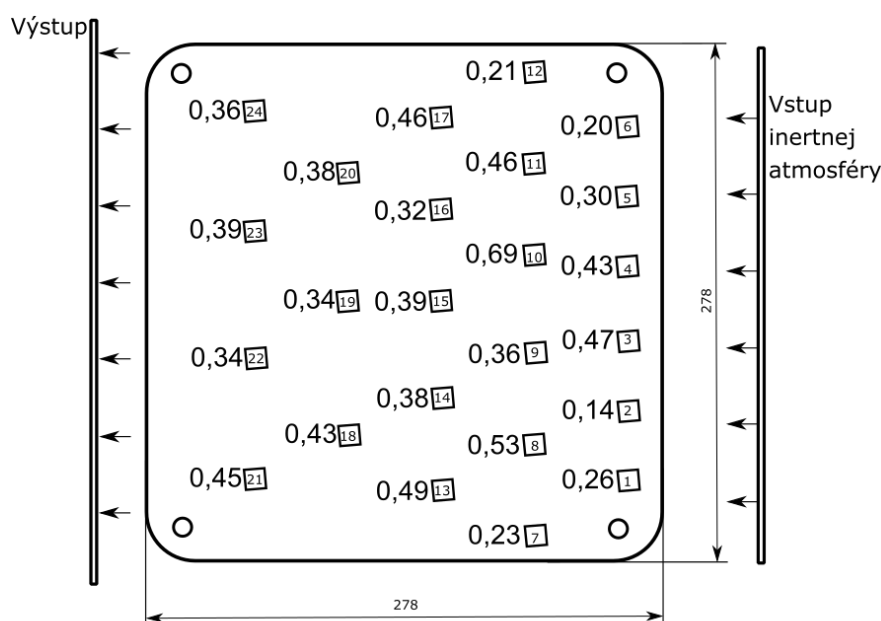
## 4.2.5 Test porozity

Na zhodnotenie kvality stavby pôvodnej konfigurácie stavebnej komory bola navrhnutá testovacia stavba, podľa ktorej bolo možné identifikovať miesta so zvýšenou porozitou. Na všetkých testovaných vzorkách boli použité rovnaké procesné parametre, aby bola následne možná korelácia porozity jednotlivých vzoriek spolu s rýchlosťou prúdenia v stavebnej komore. Procesné parametre použité pre testovaciu stavbu sú uvedené v (Príloha A

Tab. 12-1). Pri stavbe bola použitá väčšia stavebná platforma o rozmeroch (278 mm x 278 mm), aby bolo možné zachytenie porozity v čo najširšom spektre rýchlostí.

Na vyhodnotenie kvality stavby bolo navrhnutých 24 kociek o rozmeroch (10 mm x 10 mm x 8 mm). Umiestnenie kociek na stavebnej platforme bolo strategicky navrhnuté na základe simulácii prúdenia. To znamená, že najbližšie vstupu bol umiestnený najvyšší počet kociek, keďže v tomto mieste je najväčší gradient rýchlostí zistený pomocou simulácií a experimentálneho merania. So zvyšujúcou sa vzdialenosťou od vstupu sa postupne počet testovacích kociek po šírke platformy znižoval. Zároveň bola pozícia kociek volená tak, aby nedochádzalo k priamemu nánosu splodín a tuhých častíc na ostatné vzorky. Na test bol použitý materiál AlSi10Mg. Na (Obr. 4-17) je viditeľná stavebná platforma s umiestnením testovacích kociek a výslednou porozitou. Rýchlosť prúdenia bola nastavená na 75 % výkonu pumpy, pretože táto hodnota predstavuje najčastejšie používanú hodnotu výkonu pumpy. V komore bol počas stavby udržiavaný štandardný pretlak 12 mbar.

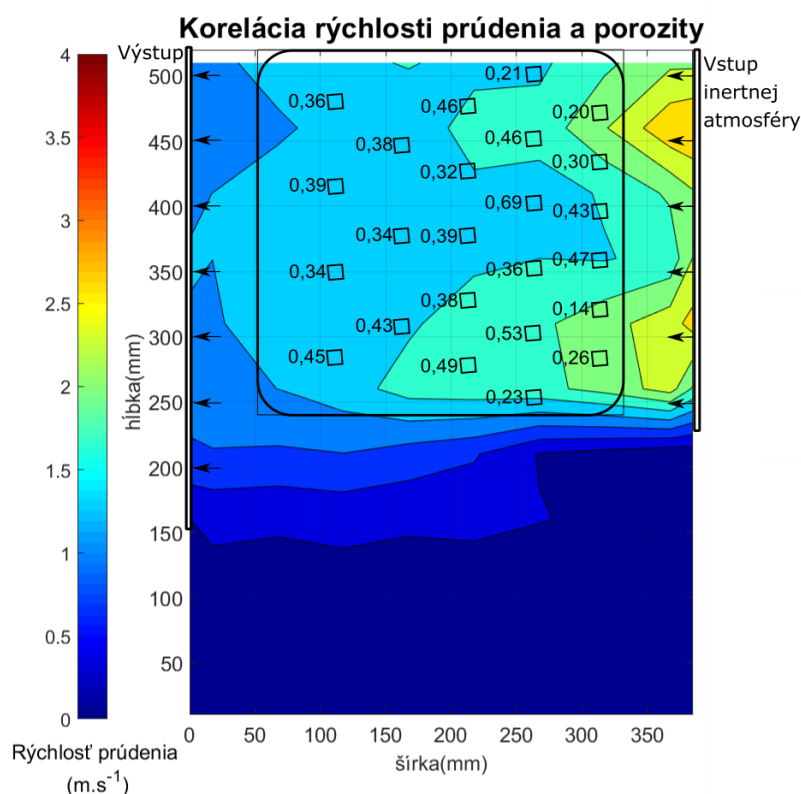
Vyhodnotenie porozity prebiehalo metódou skúmania metalografických výbrusov pomocou optického mikroskopu (KEYENCE VHX-6000). Rozloženie vzoriek na stavebnej platforme a výsledky porozity sú znázornené na (Obr. 4-17).



Obr. 4-17 Stavebná platforma s naznačenými vzorkami pri ktorých je uvedená hodnota porozity jednotlivých vzoriek v (%) (v kockách je uvedené ich číslovanie na neskorší popis).

## 4.2.6 Korelácia porozity s rýchlosťou prúdenia

Výsledkom experimentálnych meraní rýchlosti prúdenia (vo výške 12 mm nad stavebnou rovinou) a testov porozity vzoriek na stavebnej platforme bola korelácie medzi porozitou a rýchlosťou prúdenia (Obr. 4-18). Z vyhodnotenia prvého stĺpcu kociek (kocky 1 až 6 vid' Obr. 4-17 a Obr. 4-18) vyplynulo, že pri vyššej rýchlosti prúdenia okolo  $2,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  došlo k zníženiu porozity až na 0,14 % pričom v oblasti kde sa pohybovala rýchlosť prúdenia na úrovni  $1,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  sa porozita vzoriek zvýšila na 0,47 %. V druhej rade vzoriek (7 až 12) bola pozorovateľná znížená porozita v krajných bodoch platformy na hranici vyššej rýchlosti prúdenia a nízkej rýchlosti prúdenia ( $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Fakt, že sa v daných miestach vyskytovali vzorky s nižšou porozitou mohol byť podporený aj tým, že pred vzorkami 7 a 12 sa nenachádzala žiadna ďalšia vzorka, ktorá by mohla spôsobovať kontamináciu pri ďalšej vrstve. V nasledujúcich radách už nedochádzalo k výraznej korelácii s rýchlosťou prúdenia, keďže rozdiely v rýchlostiach sa pohybovali na úrovni  $0,29 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a pravdepodobne sa viac prejavoval vplyv kontaminácie od ostatných vzoriek.

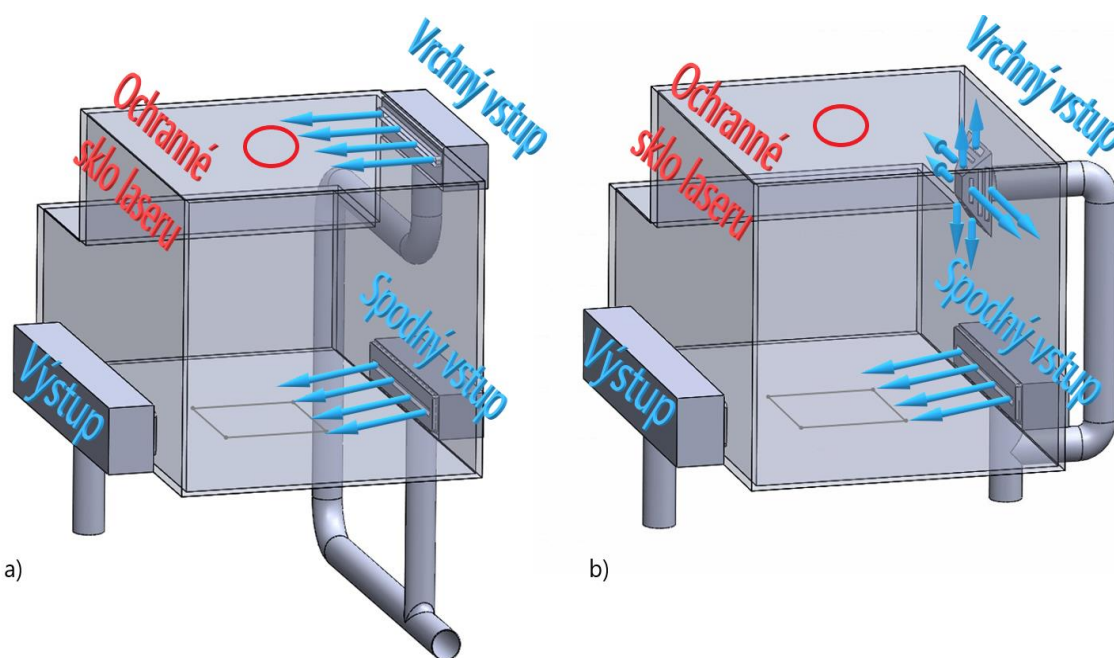


Obr. 4-18 Kontúry rýchlosti získané z experimentálneho merania v pohľade zhora s naznačenou stavebnou platformou spolu s naznačenými vzorkami kociek (hodnoty vedľa kociek predstavujú ich porozitu v (%))

Výsledky poukazujú na možnosť korelácie medzi rýchlosťou prúdenia a porozitou, ale taktiež len do určitej miery. Korelácia medzi rýchlosťou prúdenia a porozitou bola možná pri rozdieloch v rýchlostiach väčších ako  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

### 4.3 Spôsoby distribúcie inertnej atmosféry v stavebnej komore

Prívod inertnej atmosféry do stavebnej komory je možné riešiť za pomoci dvoch rozdielnych prístupov. Prvým spôsobom prívodu inertnej atmosféry je usmernené prúdenie na vrchnom aj spodnom vstupe (viď Obr. 4-19 a)). Druhým je neusmernené prúdenie z vrchnej časti stavebnej komory, pričom spodný vstup má prúdenie usmernené (viď Obr. 4-19 b)). Výhodou usmerneného prúdenia je možnosť priameho ofukovania ochranného skla lasera z vrchného vstupu, čím je možné zabrániť jeho zanášaniam od kondenzátu a tuhých častíc. Nevýhodou môže byť vznik turbulentných vírov, ktoré môžu narušovať prúdenie zo spodného vstupu.

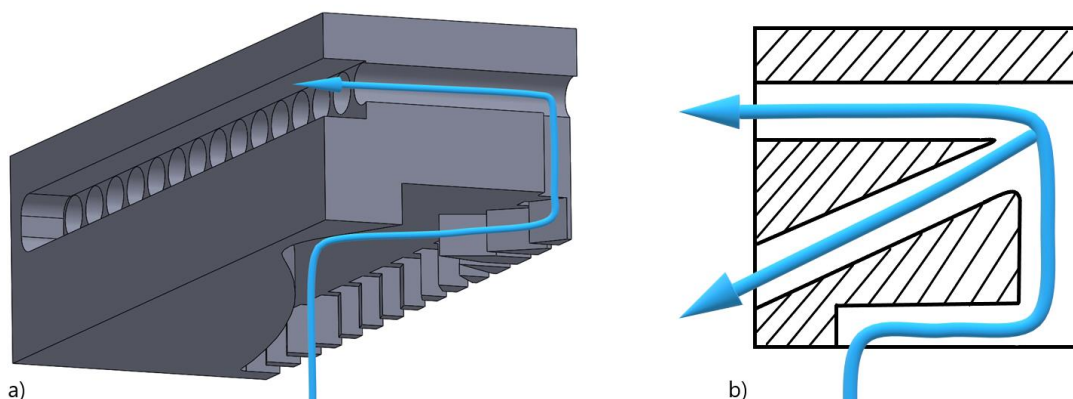


Obr. 4-19 Spôsoby distribúcie inertnej atmosféry v stavebnej komore: a) vrchný vstup s usmerneným prúdením, b) vrchný vstup s neusmerneným prúdením.



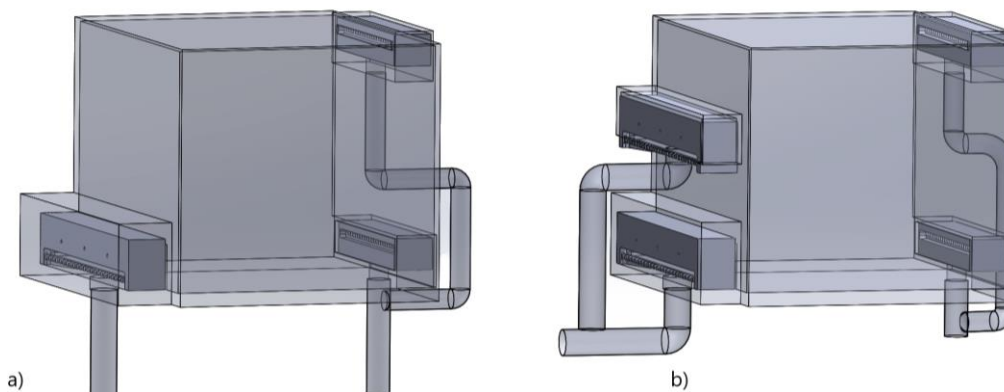
## 4.4 Základné konštrukčné varianty

Na základe rešerše a priestorového usporiadania funkčných častí stavebnej komory boli navrhnuté dve základné varianty riešenia. Prvá pozostáva z rozdelenia vrchného vstupu inertnej atmosféry do stavebnej komory na dva segmenty. Úlohou prvého segmentu (Obr. 4-20 b)) je ofukovanie skla, cez ktoré pôsobí laserový lúč. Druhý segment je nasmerovaný nadol tak, aby pôsobil zhora na prúd inertnej atmosféry vychádzajúci zo spodného vstupu (Obr. 4-20 b)). Uhol druhého segmentu bude nastavený tak, aby nedochádzalo k cirkulácii inertnej atmosféry spolu so splodinami v stavebnej komore.



Obr. 4-20 Vrchný vstup inertnej atmosféry, prívod plynu do vstupu je realizovaný pomocou trubky zdola ďalej je trajektória častíc znázornená modrou čiarou; a) pôvodný vstup inertnej atmosféry; b) prvý koncepčný návrh úpravy, kde bude upravený vrchný vstup inertnej atmosféry s rozdelením na dva segmenty.

Druhý variant pozostáva z pridania ďalšieho výstupu do stavebnej komory (Obr. 4-21). Prídavný výstup by mal zaistiť vyššiu rýchlosť vo vrchnej časti stavebnej komory a odvádzať tak kondenzát a splodiny preč zo stavebnej komory efektívnejšie. Výhoda spočíva v lepšom odvádzaní splodín spod ochranného skla laseru a vo využití otvoru v bočnej stene stavebnej komory na pridanie prídavného výstupu do cirkulačného okruhu.



Obr. 4-21 Stavebná komora spolu zo vstupmi a výstupmi: a) pôvodná konfigurácia komory s jedným výstupom; b) druhá koncepčná variant s prídavným výstupom.

## 4.5 Koncepčné varianty spodného distribútora prúdenia

Keďže experimentálne merania potvrdili koreláciu medzi porozitou testovacích vzoriek a rýchlosťou prúdenia nad stavebnou platformou (viď kap. 4.2.6) na ktorú má najväčší vplyv spodný distribútor prúdenia, tak najväčší dôraz bol kladený návrhu práve tejto časti cirkulačného okruhu.

Prvý variant pozostával z rozdeľovania prúdenia pomocou bifurkačného distribútora (Obr. 4-22). V danom koncepte je rovnomernosť v jednotlivých vetvách rozdeľovača prúdenia závislá na rovnomernosti prúdenia v prívodnej trubke. Pokiaľ je profil v prívodnej trubke nerovnomerný, tak dôjde k rozdeleniu prúdenia na dve vetvy s rozdielnymi prietokmi. Preto je dôležité vždy zaručiť symetrický profil po každom rozdelení v čo najkratšej možnej dĺžke. Minimálna požadovaná šírka na ktorú je potrebné prúdenie distribuovať čo najrovnomernejšie je 278 mm (šírka stavebnej platformy). Daný koncept sa pri požadovanej šírke distribúcie prúdenia vymyká spod rozmerov do ktorých je potrebné rozmery distribútora vtesnať.



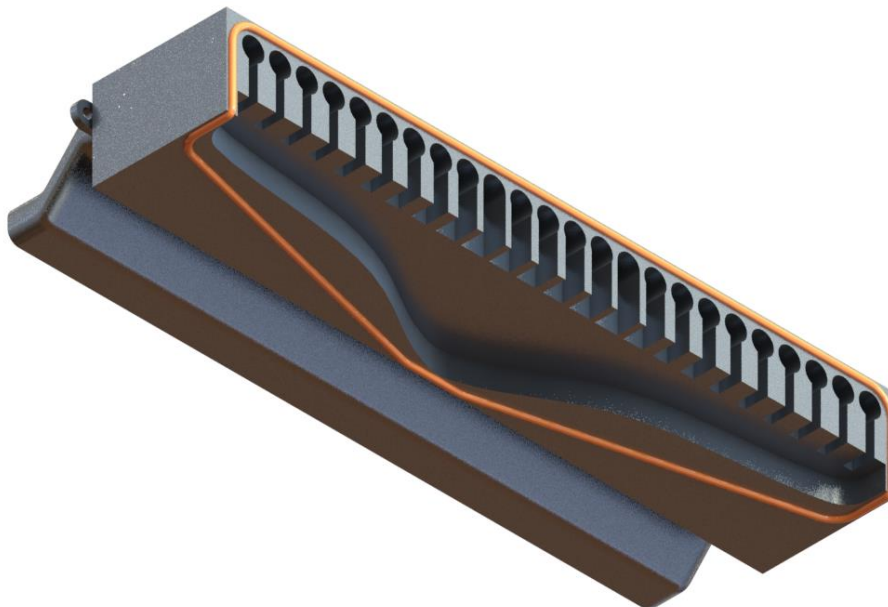
Obr. 4-22 Variant bifurkačného distribútora prúdenia.

Druhý navrhnutý variant pozostával z koncepcie rozdeľovania prúdenia už v spodnej časti prívodnej trubky pomocou priečok, pričom k ďalšej distribúcii by boli využité trubky (Obr. 4-23). Problém danej varianty spočíval v nutnosti návrhu jednotlivých trúbok tak, aby v nich vznikali rovnaké tlakové straty, teda aby rýchlosť prúdenia na jednotlivých výstupoch dosahovala čo najrovnomernejšie hodnoty. Ďalšia nevýhoda spočíva vo väčšej výške distribútora nad stavebnou platformou.



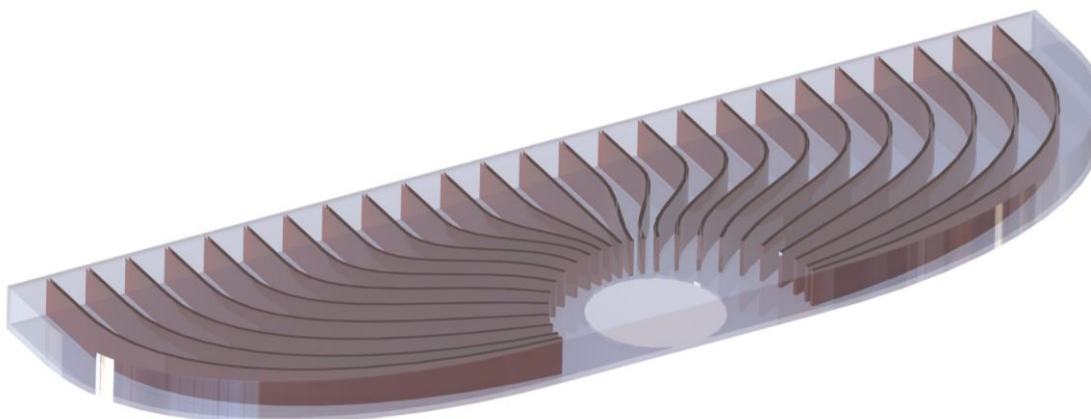
Obr. 4-23 Variant spodného distribútora prúdenia s využitím rozdelenia už v prívodnej trubke.

Tretí variant pozostával z modifikácie pôvodného riešenia distribútora inertnej atmosféry (Obr. 4-24). Hlavnou úlohou modifikácie pôvodného riešenia bolo zvýšiť rýchlosť v centrálnej časti distribútora a presmerovať prúdenie tesne nad stavebnú platformu, tak aby nedochádzalo k jeho víreniu.



Obr. 4-24 Variant modifikácia pôvodného riešenia.

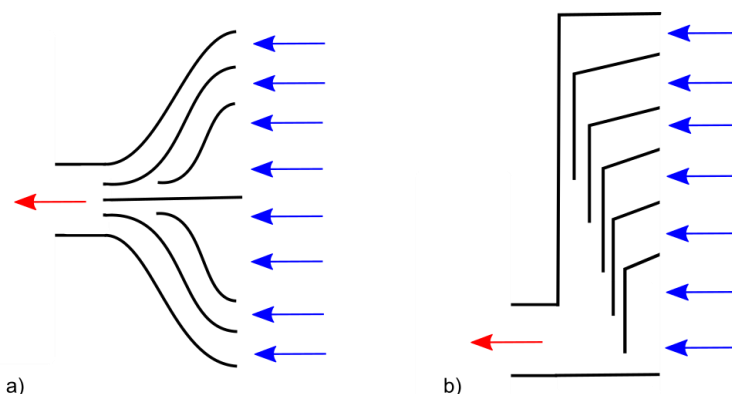
Štvrtý variant (vid' Obr. 4-25) vychádzal z distribúcie prúdenia pomocou lamiel. V danom koncepte bolo možné variovať so vzdialenosťou medzi lamelami, pomocou ktorej bolo možné nastaviť rýchlosti na jednotlivých výstupoch. Pozitívum daného riešenia spočíva v možnosti znížiť výšku celého distribútora nad stavebnou platformou na minimum pri zachovaní malých zástavbových rozmerov. K nesporným výhodám patrí aj vznik menších tlakových strát z dôvodu minima ostrých zahnutí distribútora.



Obr. 4-25 Variant s lamelami.

## 4.6 Konceptčné varianty prídavného výstupu

Geometria prídavného výstupu by mala zaručovať spoľahlivý odvod splodín z objemu stavebnej komory. Rovnomerné rozloženie rýchlostí na čo najväčšej ploche je možné dosiahnuť rozdelením prídavného výstupu na segmenty. Boli navrhnuté dva koncepty, ktoré sa odvíjajú od rozdeľovania prúdenia za pomoci lamiel. Prvý koncept pozostáva z lamiel, ktoré rozdeľujú prúdenie už v trubke výstupu (Obr. 4-26 a)), druhý koncept tvoria lamely, ktoré rozdeľujú prúdenie pred výstupnou trúbkou (Obr. 4-26 b)).

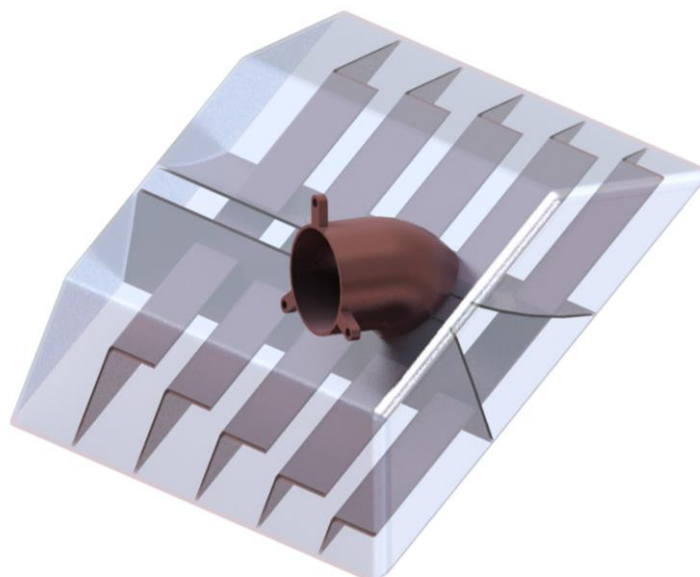


Obr. 4-26 Konceptné riešenia odvodu: a) Prvý koncept, kde dochádza k distribúcii prúdenia vo výstupnej trubke, b) Druhý koncept, kde dochádza k rozdeľovaniu prúdenia pred výstupnou trúbkou (modré šípky znázorňujú vstup do výstupu a červené odťah).

### 4.6.1 Návrh č. 1

Kombináciu vyššie uvedených konceptných riešení vznikol návrh odvodu splodín č. 1 (viď Obr. 4-27). Tvoria ho lamely, ktoré rozdeľujúce prúdenie vo vertikálnom a horizontálnom smere. Lamely distribujúce prúdenie vo vertikálnom smere siahajú až po začiatok výstupnej trubky.

Umiestnenie distribútora bolo v danom prípade plánované tak, aby mal sklon  $45^\circ$  z čoho vyplynula jeho minimálna výška 158 mm. Daný návrh bolo potrebné otestovať aj pomocou CFD simulácií, aby bolo možné zistiť, či je daný koncept schopný efektívneho rozdeľovania prúdenia po celej jeho výške.



Obr. 4-27 Návrh č. 1, ktorý tvoria lamely rozdeľujúce prúdenie v horizontálnom a vertikálnom smere.

### CFD simulácia návrhu č. 1

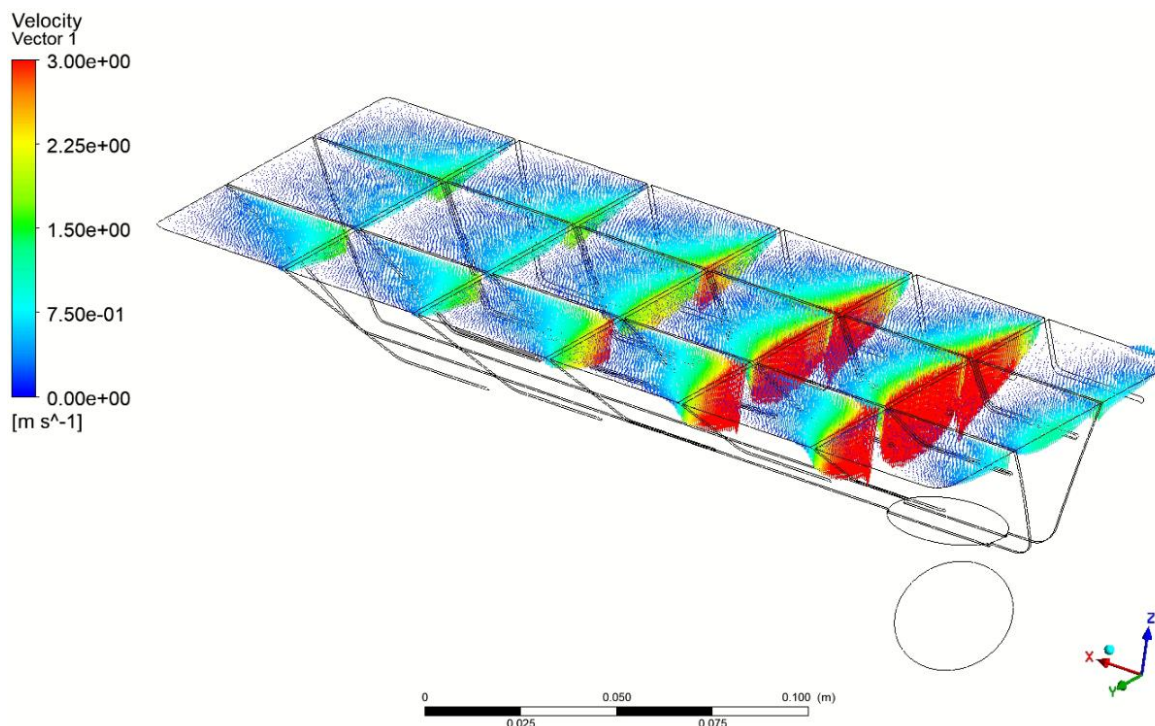
Na overenie funkčnosti daného konceptu bolo potrebné zistiť rozloženie rýchlostí na vstupnej časti výstupu. Pri simulácii bolo nutné využiť známe hodnoty pretlaku v stavebnej komora (12,5 mbar) a hodnoty výstupného tlaku (7,5 mbar). Okrajové podmienky použité pre simuláciu sú uvedené v (Tab. 4-5).

Tab. 4-5 Okrajové podmienky použité pre simuláciu návrhu č. 1.

<b>Okrajové podmienky použité pre simuláciu návrhu č. 1</b>	
Ustálené prúdenie (Steady state)	–
Pressure based solver	–
Nestlačiteľné prúdenie	–
Vstupný tlak (Pressure inlet)	1250 Pa
Výstupný tlak (Pressure outlet)	750 Pa
Turbulentný model	k-ε realizable
Stenová funkcia (Wall function)	Scalable Wall Function
Prúdiace médium	vzduch

Na vstupnej časti prídavného výstupu bola zadaná intenzita turbulencií 4 % vypočítaná na základe meraní pôvodnej konfigurácie, kde sa rýchlosť pred výstupom zo stavebnej komory pohybovala na úrovni  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

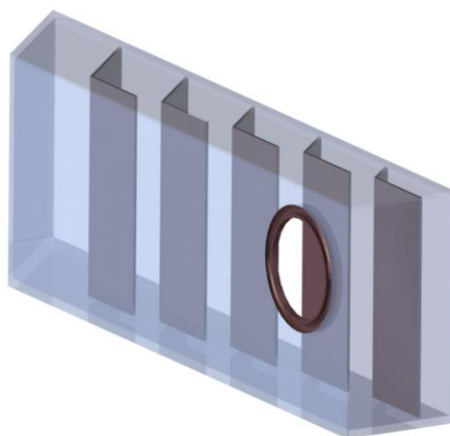
Vo výpočtovej sieti bolo použité zjemnenie pri stene (inflation layer) v 2 vrstvách. Konvergencia výsledku bola považovaná pri klesnutí reziduí pod  $1 \cdot 10^{-3}$ . Z výsledkov simulácií vyplýva, že výška distribútora 158 mm nie je pri danom koncepte prídavného odvodu prijateľná, pretože rozdelenie rýchlostí nie je rovnomerné (viď Obr. 4-28).



Obr. 4-28 Výsledky simulácie návrhu č.1, zobrazujú vektory rýchlosti vo vstupnej časti kde je možné pozorovať ich nerovnomerné rozloženie.

#### 4.6.2 Návrh č. 2

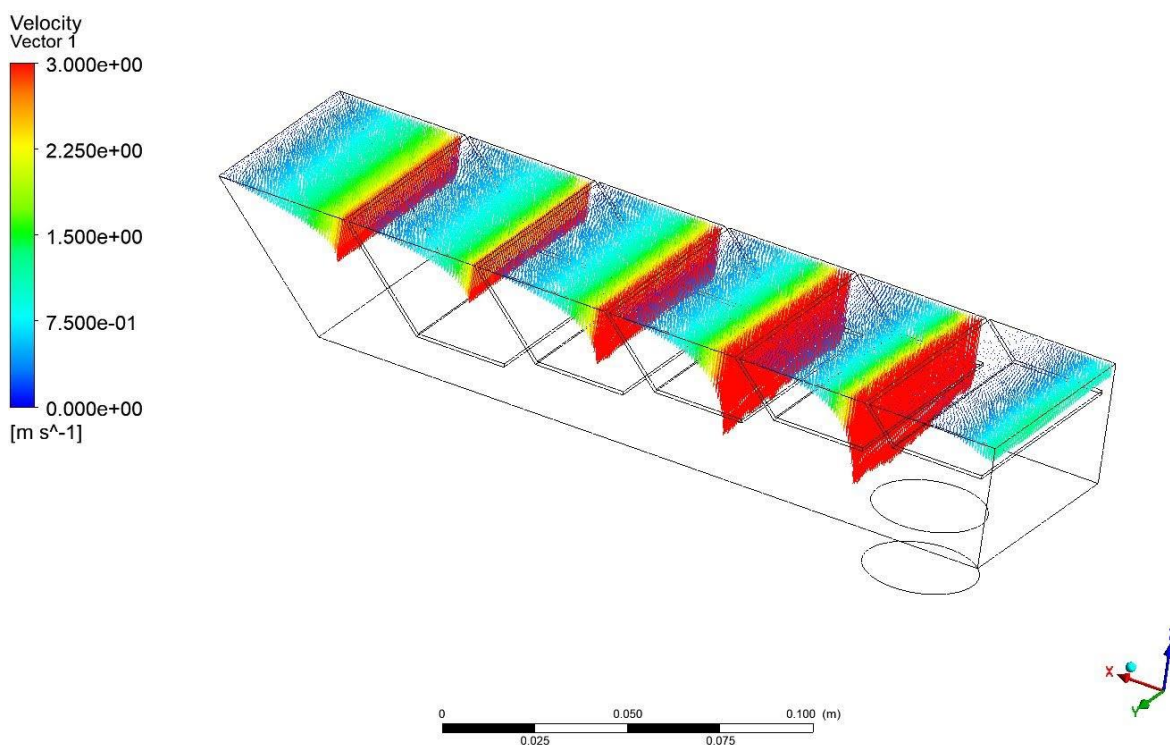
Ďalšiu koncepčný variant tvoria lamely rozdeľujúce prúdenie v horizontálnom smere. Vo svojej podstate sa jedná o zjednodušený návrh č. 1. Daný návrh vznikol primárne z dôvodu, že v návrhu č. 1 nebolo možné rozdeľovať prúdenie rovnomerne po celej výške prídavného odvodu.



Obr. 4-29 Návrh č. 2., ktorý tvoria lamely rozdeľujúce prúdenie vo vertikálnom smere

CFD simulácie návrhu č. 2 mali rovnaké okrajové podmienky ako v prípade návrhu č.1 uvedené v (Tab. 4-5). Výpočtová sieť použitá v danom návrhu mala taktiež identickú štruktúru.

Z výsledku simulácií vyplýva, že výška distribútora 70 mm nepožaduje lamely na horizontálne rozdeľovanie prúdenia, pretože rozloženie rýchlostí po výške je rovnomerné oproti návrhu č. 1 (viď Obr. 4-30)



Obr. 4-30 Vykreslenie vektorov na vstupe výstupu, kde je už viditeľné rovnomerné rozloženie vektorov rýchlostí po šírke distribútora.

## 4.7 Výsledné riešenie a zhodnotenie

Po analyzovaní charakteru prúdenia a lokalizácie miest zo zníženou rýchlosťou prúdenia a teda zvýšenou porozitou, bolo zistené, že bude nutné navrhnuť spodný distribútor prúdenia, ktorý má najzásadnejší vplyv na porozitu a odvádzanie splodín a tuhých častíc z miesta tavenia materiálu. Z koncepčných riešení bol pre návrh spodného distribútora vybraný štvrtý koncept spodného distribútora prúdenia s lamelami. Jeho primárnou výhodou je možnosť zníženia výšky distribútora na úplné minimum, ďalšie výhody spočívajú v možnosti rozdeľovania prúdenia za pomoci postupnej zmeny vzdialenosti jednotlivých segmentov lamiel bez značnej úpravy celkovej geometrie. Ďalšia jeho výhoda spočíva v možnostiach jeho výroby pomocou technológie SLM.

Na usmernenie prúdenia z vrchného distribútora bude navrhnutá úprava v podobe deflektoru prúdenia, ktorý má za úlohu smerovať prúdenie na ochranné sklo a zamedziť tak jeho zanášaniamu kondenzátom.

Na zlepšenie odvádzania kondenzátu spod ochranného skla laseru bude navrhnutý prídavný výstup. Z konceptov bol vybraný koncept č. 2, ktorý by mal zaručovať odvádzanie splodín po celej jeho výške. Ďalšia jeho výhoda spočíva aj v jednoduchšej možnosti výroby.



## 5 KONŠTRUKČNÉ RIEŠENIE

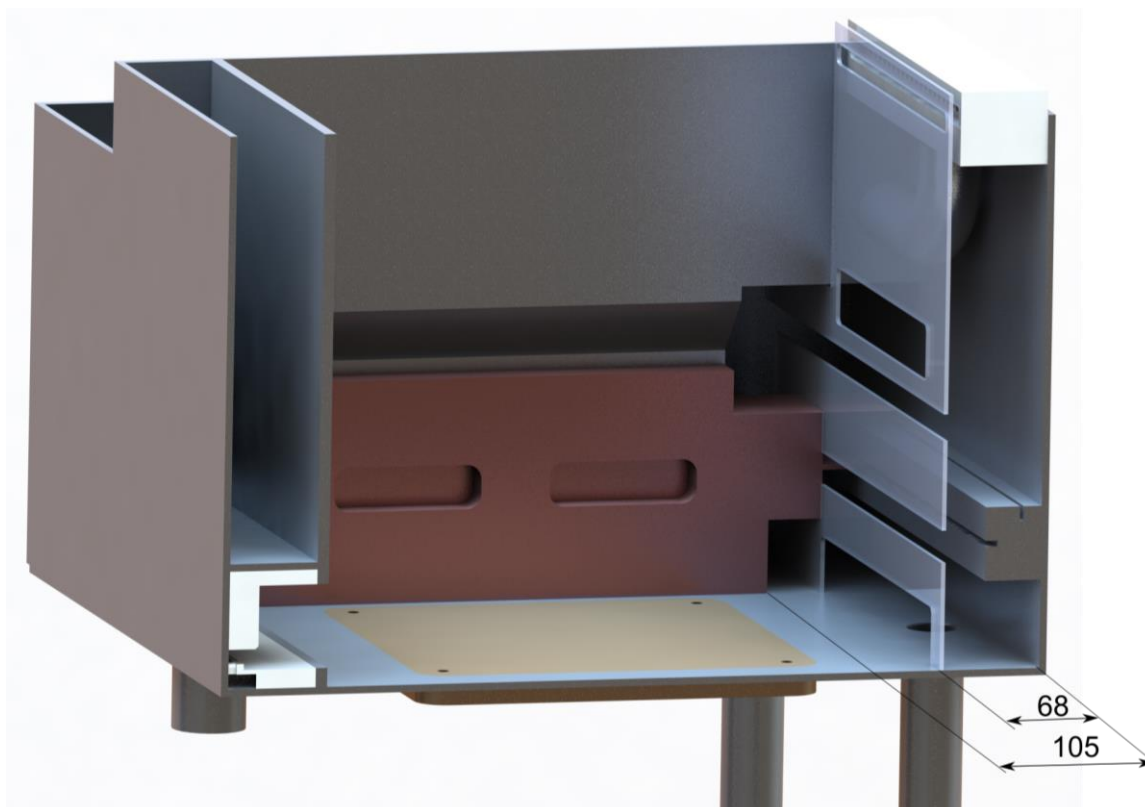
Prvá časť tejto kapitoly sa venuje návrhu spodného distribútora prúdenia na ktorý bol kladený najväčší dôraz, keďže priamo ovplyvňuje prúdenie nad stavebnou platformou. Nasledujúca časť tejto kapitoly sa venuje návrhu deflektoru prúdenia na vrchný distribútor. Posledná časť je venovaná návrhu prídavného výstupu.

Po návrhu komponentov nasledovala výroba prototypov na FDM tlačiarňi. Nasledovalo ich testovanie za pomoci merania rýchlostného poľa a porozity vzoriek. Po testoch došlo k miernej konštrukčnej zmene v prídavnom výstupe. Finálne funkčné vzorky boli vyrobené na SLM a FDM tlačiarňi a v závere prebehla ich validácia za pomoci merania rýchlostného poľa.

### 5.1 Návrh spodného distribútora prúdenia

Keďže sa jednalo o špecifický problém distribúcie prúdenia, kde bolo potrebné presmerovať prúdenie v relatívne malom zástavbovom priestore z vertikálneho do horizontálneho smeru po celej šírke stavebnej platformy, tak v danom prípade nebolo rozloženie prúdenia predikovateľné analytickými výpočtami. Preto bola pre návrh zvolená metóda, kde sa postupným iteračným procesom dosiahlo požadovaného rovnomerného rozloženia rýchlostí naprieč distribútorom. Návrh distribútora, konkrétne overovanie rovnomerného rozloženia rýchlostí v jednotlivých verziách návrhu prebiehalo v programe Ansys Fluent.

Aby bol distribútor schopný rozdeľovať prúdenie ponad celú stavebnú platformu rovnomerne, tak bola zvolená jeho šírka 285 mm (šírka stavebnej platformy 278 mm). Možná dĺžka distribútora bola oproti pôvodnej verzii s dĺžkou 68 mm predĺžená na 105 mm od bočnej steny (Obr. 5-1). Využitelnú dĺžku distribútora sa podarilo predĺžiť z dôvodu využitia priestoru pod ramenom nanášača prášku. Finálna dĺžka bola stanovená na 93 mm, aby nedošlo k takmer úplnému zastaveniu prívodu inertnej atmosféry počas prejazdu nanášača prášku popred distribútor, čo by mohlo spôsobovať vírenie prášku z dôvodu lokálneho navýšenia rýchlostí v malej medzere medzi distribútorom a nanášačom.



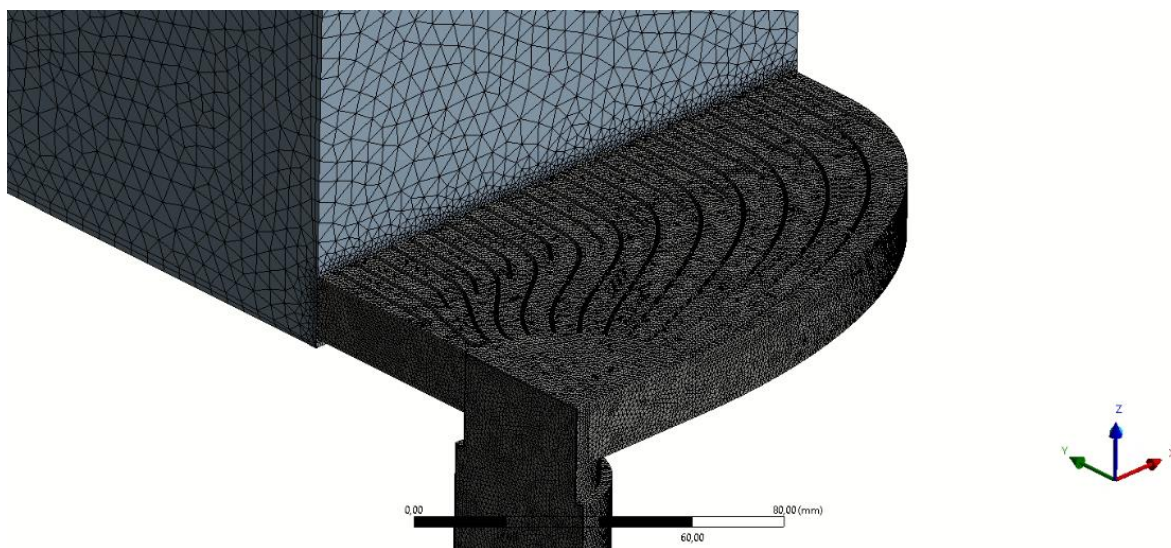
Obr. 5-1 Využitelná dĺžka distribútora pri návrhu.

Ďalším parametrom, ktorý bolo potrebné pri návrhu zvoliť bola výška distribútora. Priemer pôvodných vstupných otvorov dosahoval 10 mm. Na základe výskumu, ktorý publikoval Philo [25] je možné zväčšením priemeru koncovkej časti vstupu dosiahnuť zníženie koncentrácie splođín na procesnej ploche. Preto bola výška otvorov distribútora zvýšená na 15 mm čím sa dosiahne zväčšenie prietokného prierezu z  $1885 \text{ mm}^2$  na  $3780 \text{ mm}^2$ .

### 5.1.1 CFD simulácie

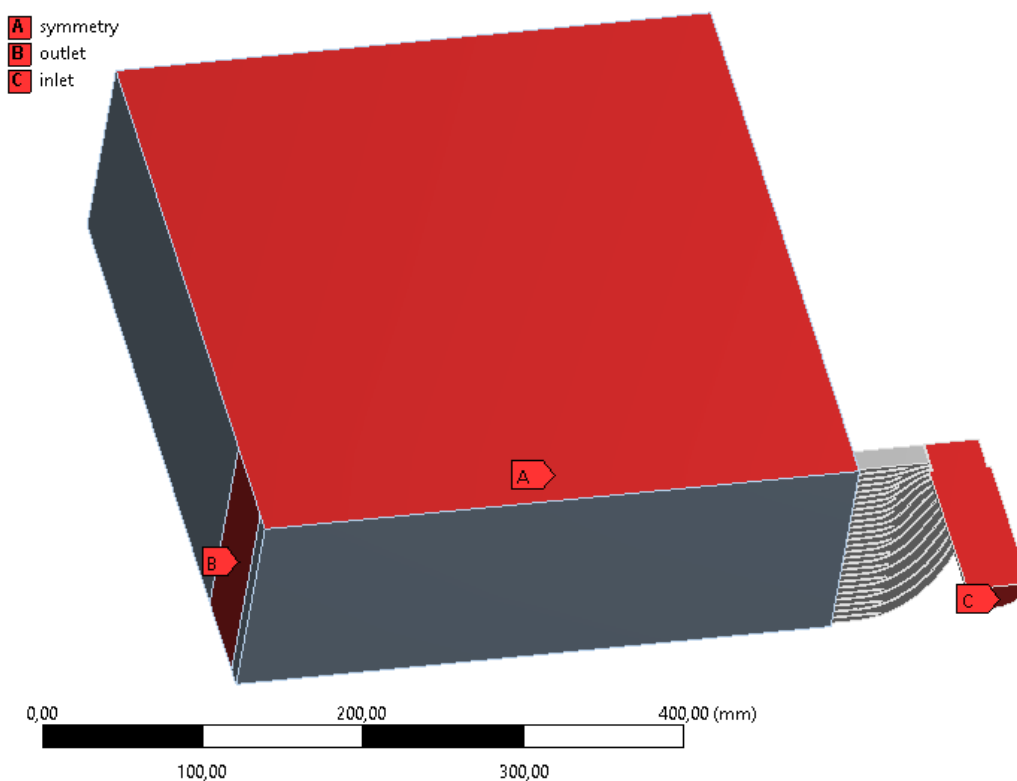
Prvým krokom v simuláciách bolo vytvorenie negatívu a úprava geometrie v podobe odstránenia malých hrán. Keďže je distribútor prúdenia symetrický diel a primárnym cieľom simulácií bolo zaistiť rovnomerné rozloženie rýchlostí na jeho výstupoch a na stavebnej platforme, tak bol celý prípad uvažovaný s využitím symetrie, čím sa podarilo dosiahnuť nižší počet prvkov výpočtovej siete a teda aj nižší výpočtový čas pri jednotlivých iteráciách riešenia. Vrchný vstup v simulácii nebol uvažovaný, pretože by mohol spôsobovať vznik skreslených údajov pri analýze rýchlostí tesne nad stavebnou platformou a simulácia by si vyžadovala dlhší výpočtový čas. Z výsledkov simulácií boli vyhodnocované priemerné rýchlosti v jednotlivých segmentoch distribútora a zároveň bola sledovaná aj rovnomernosť rozloženia rýchlostného poľa nad stavebnou platformou.

Výpočtová sieť použitá pre simulácie mala rovnakú kompozíciu ako v predchádzajúcich simuláciách. Tvorili ju štvorsteny s počtom prvkov 3 290 033 so zjemnením siete (inflation layer) pri stene v 2 vrstvách (vid' Obr. 5-2).



Obr. 5-2 Výpočtová sieť použitá pre simulácie.

Na vstup bola zadaná rýchlosť (velocity inlet) získaná z počiatočných simulácií stavebnej komory a intenzita turbulencií 5 %. Na výstup bola zadaná okrajová podmienka (pressure outlet) a rovnako intenzita turbulencií 5 % (Obr. 5-3). Všetky okrajové podmienky nastavené pre výpočet sú uvedené v (Tab. 5-1).



Obr. 5-3 Nastavenie okrajových podmienok.

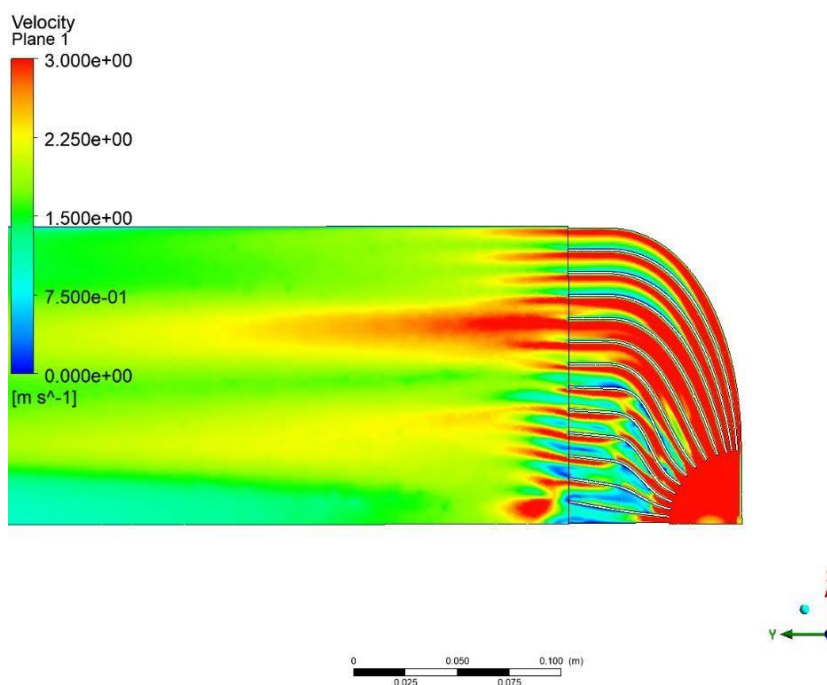
Tab. 5-1 Okrajové podmienky použité pre simulácie.

Okrajové podmienky použité pre simulácie pri 75 % výkone pumpy	
Ustálené prúdenie (Steady state)	–
Pressure based solver	–
Nestlačiteľné prúdenie	–
Vstupná rýchlosť (Velocity inlet)	6,1 m·s <sup>-1</sup>
Výstupný tlak (Pressure outlet)	0 Pa
Turbulentný model	k-ε realizable
Stenová funkcia	Standard wall function
Prúdiace médium	vzduch

Konvergencia výsledku bola považovaná pri klesnutí reziduí pod  $1 \cdot 10^{-3}$ .

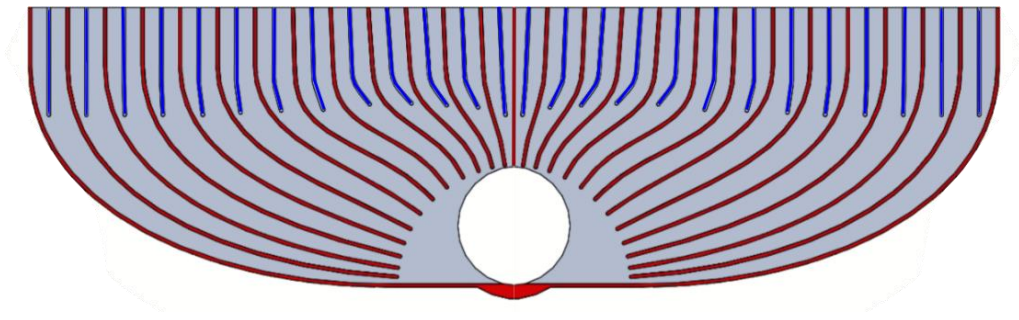
### Optimalizácia tvaru

Pri optimalizácii bolo zistené, že pri distribúcii prúdenia pomocou primárnych lamiel dochádza k lokálnemu navyšovaniu rýchlostí na stavebnej rovine v oblasti tesne za distribútorom (Obr. 5-4).



Obr. 5-4 Lokálne navyšovanie rýchlostí pri použití primárnych lamiel na distribúciu.

Preto boli do distribútora pridané aj sekundárne lamely pomocou ktorých bolo možné tento efekt postupne eliminovať (Obr. 5-5).



Obr. 5-5 Distribútor a naznačenie primárnych lamiel (červená) a sekundárnych lamiel (modrá).

### Ukončenie optimalizácie

Pre ukončenie optimalizácie bol stanovený 15 % rozdiel medzi priemernou výstupnou rýchlosťou z distribútora a rýchlosťou najvyššou (a aj najnižšou) vystupujúcou z primárnych distribučných segmentov (viď rovnica (12) a (13)) [36]:

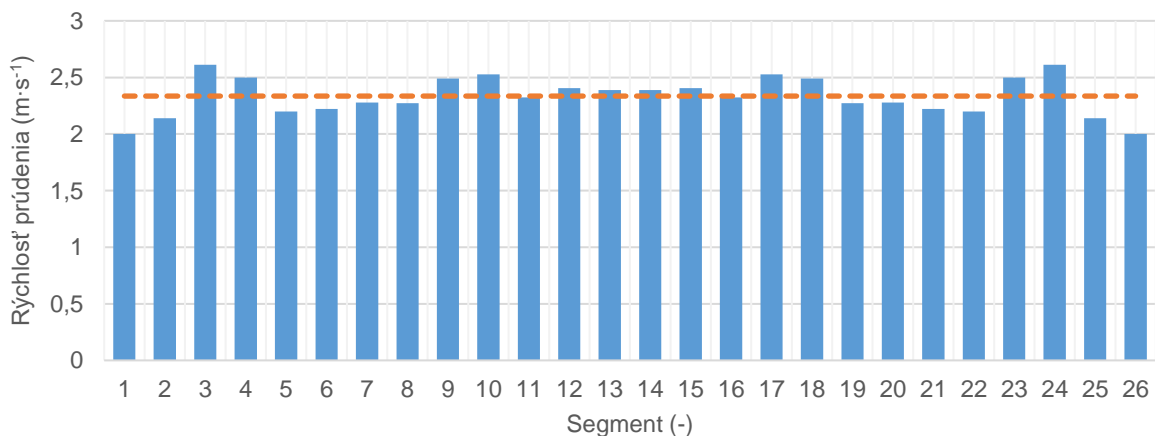
$$\frac{\bar{v}_{max} - \bar{v}}{\bar{v}} \cdot 100 < 15 \% \quad (12)$$

$$\frac{\bar{v} - \bar{v}_{min}}{\bar{v}} \cdot 100 < 15 \% \quad (13)$$

kde  $\bar{v}_{max}$  je maximálna priemerná rýchlosť prúdenia segmentom distribútora v  $m \cdot s^{-1}$ ,  $\bar{v}$  je priemerná výstupná rýchlosť z distribútora v  $m \cdot s^{-1}$ ,  $\bar{v}_{min}$  je minimálna priemerná rýchlosť prúdenia segmentom distribútora v  $m \cdot s^{-1}$ . Aby bolo dosiahnuté výsledné riešenie, tak bolo potrebné nasimulovať 21 iterácií návrhu.

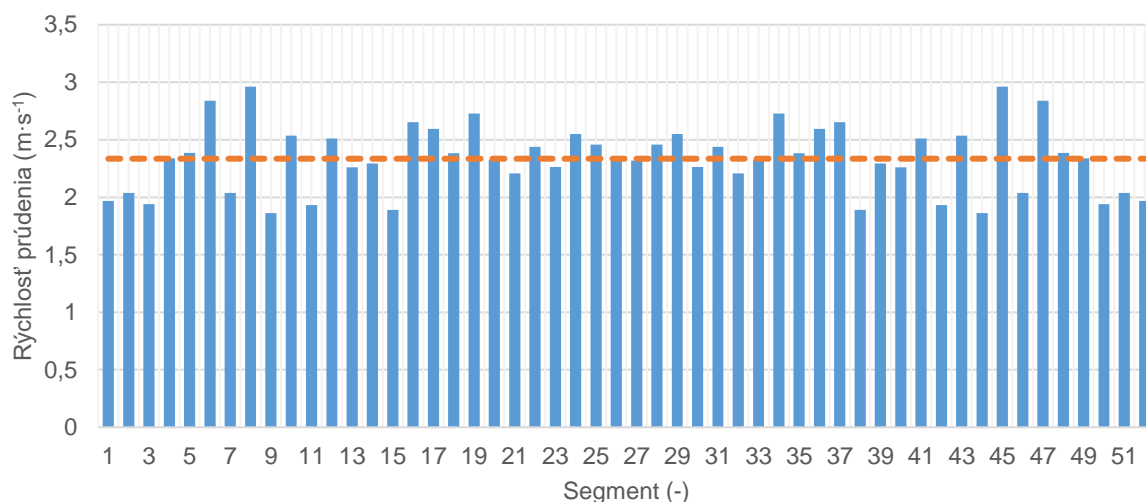
### 5.1.2 Vyhodnotenie optimalizácie spodného distribútora

Na základe kritéria ukončenia optimalizácie rýchlostí bol získaný výsledný návrh spodného distribútora. Graf (Obr. 5-6) zobrazuje priemernú rýchlosť na jednotlivých výstupoch z distribútora z ktorého je možné vyčítať, že fluktuácie rýchlostí medzi primárnymi výstupmi dosahujú maximálnej hodnoty iba  $0,61 m \cdot s^{-1}$ .



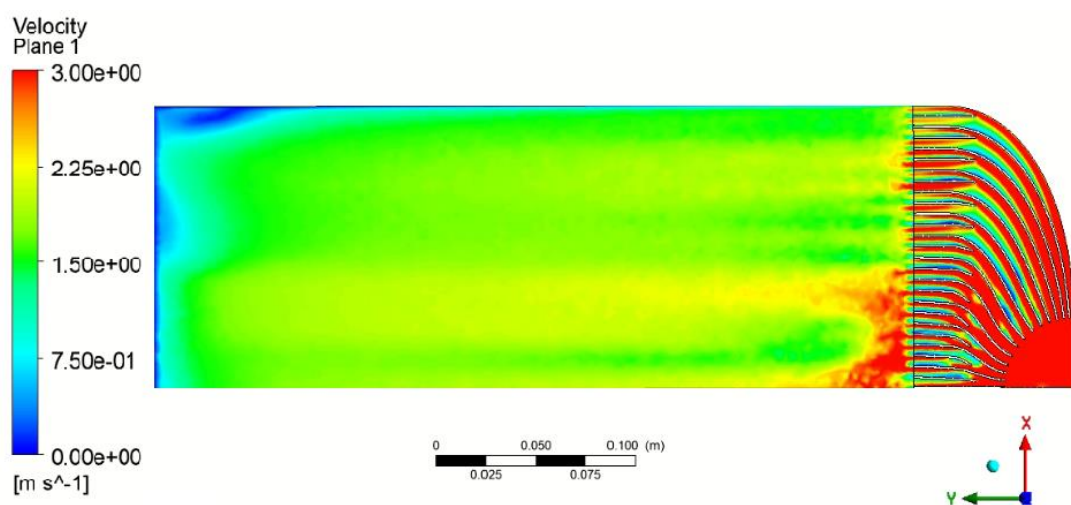
Obr. 5-6 Rozloženie priemernej rýchlosti prúdenia na primárnych segmentoch distribútora.

Pri návrhu boli zároveň sledované aj hodnoty na sekundárnych segmentoch, ktoré nemajú až tak zásadný vplyv na rovnomernosť prúdenia na stavebnej platforme, takže na nich nebolo aplikované vyššie uvedené kritérium. No taktiež bola snaha medzi nimi minimalizovať fluktuácie rýchlostí, ktoré sa podarilo znížiť na  $1,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (viď Obr. 5-7).



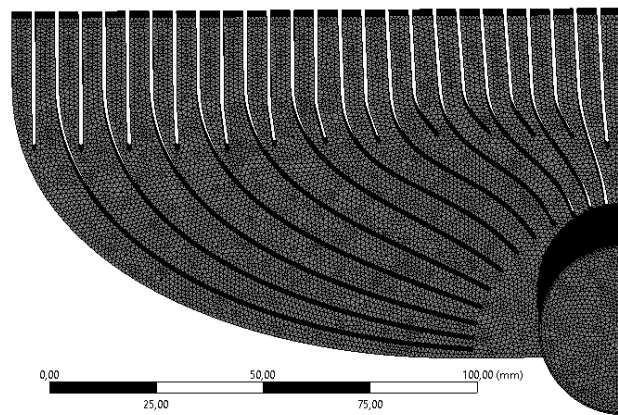
Obr. 5-7 Rozloženie priemernej rýchlosti prúdenia na sekundárnych segmentoch distribútora.

Počas iterácií boli sledované aj kontúry rýchlosti nad stavebnou rovinou. Kontúry rýchlosti výslednej verzie 12 mm nad stavebnou rovinou sú znázornené na (Obr. 5-8).



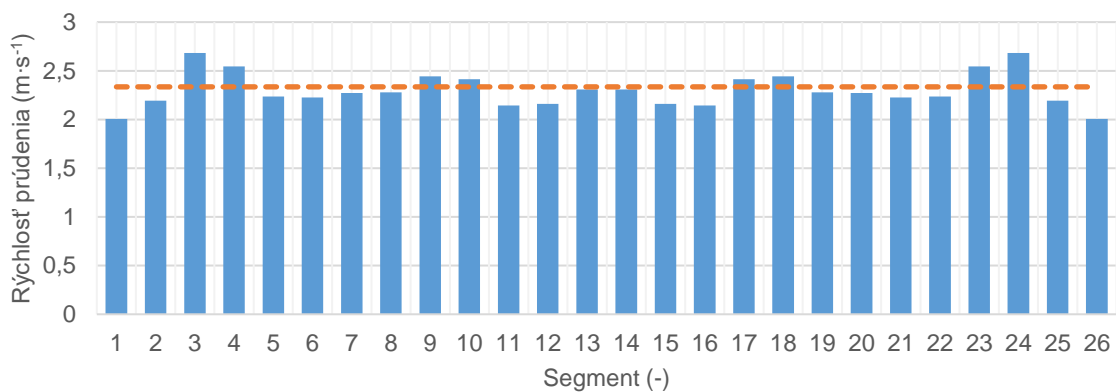
Obr. 5-8 Výsledky CFD simulácií finálnej verzie.

Na presné porovnanie fluktuácií rýchlostí pôvodného distribútora a novo navrhnutého distribútora bola zrealizovaná aj simulácia distribútora bez objemu stavebnej komory. Nastavenie okrajových podmienok bolo rovnaké ako v prípade vyššie a je uvedené v (Tab. 5-1) s tým rozdielom, že ako výstupné plochy pre podmienku (pressure outlet) boli nastavené výstupy distribútora. Výpočtová sieť mala taktiež rovnaký charakter ako v prípade vyššie (viď Obr. 5-9).

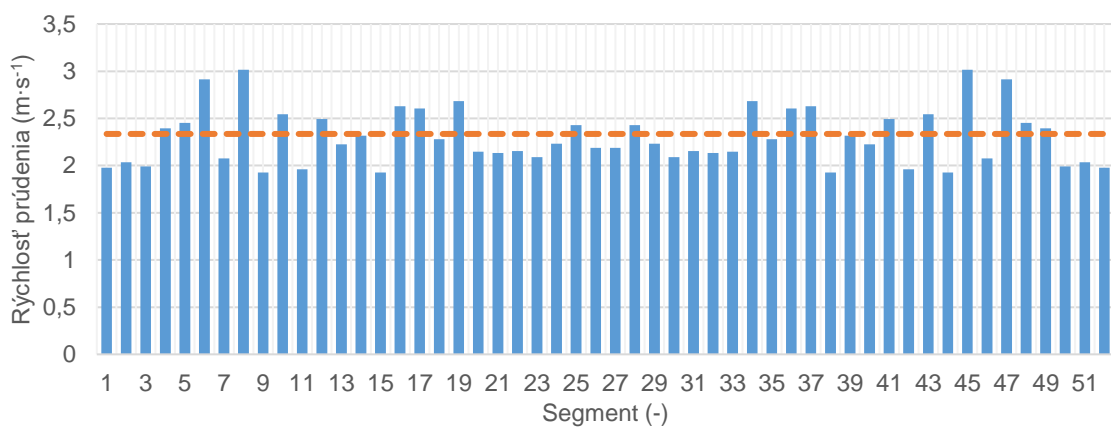


Obr. 5-9 Výpočtová sieť.

Výsledky simulácie mali ukázať priemerné rýchlosti na jednotlivých výstupoch v primárnych segmentoch (viď Obr. 5-10) a rozloženie priemerných rýchlostí na sekundárnych výstupoch je na (Obr. 5-11). Fluktuácie priemerných rýchlostí medzi primárnymi výstupmi dosahovali hodnôt  $0,68 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a medzi sekundárnymi výstupmi hodnôt  $1,08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .



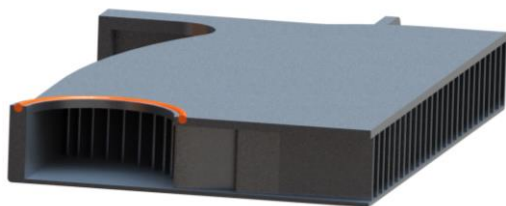
Obr. 5-10 Rozloženie priemernej rýchlosti prúdenia na primárnych segmentoch distribútora.



Obr. 5-11 Rozloženie priemernej rýchlosti prúdenia na sekundárnych segmentoch distribútora.

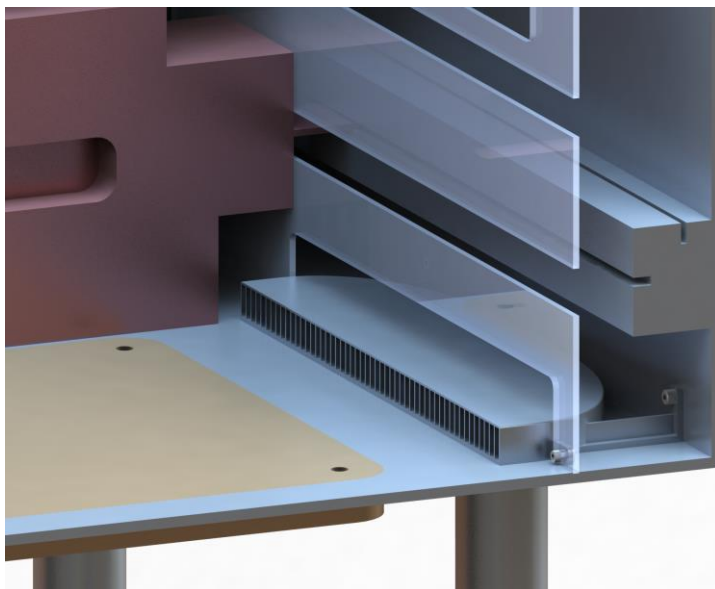
### 5.1.3 Dokončenie distribútora

Tesnosť distribútora a vstupnej trubky je zaistená pomocou 2 mm tesnenia, na ktoré bola v distribútore pripravená drážka (Obr. 5-12).

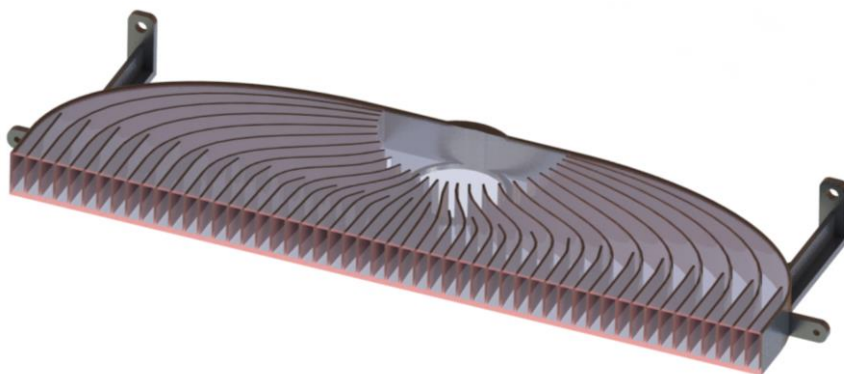


Obr. 5-12 Distribútor v reze s vloženým tesnením.

Distribútor je v komore upevnený pomocou dvoch skrutiek M4x0,7 a jeho prednú časť zaisťujú dve skrutky M3x0,5 ktorými je uchytený k bočnej demontovateľnej stene (viď Obr. 5-13).



Obr. 5-13 Upevnenie distribútora v stavebnej komore (demontovateľná stena priehľadná).



Obr. 5-14 Výsledný model distribútora.

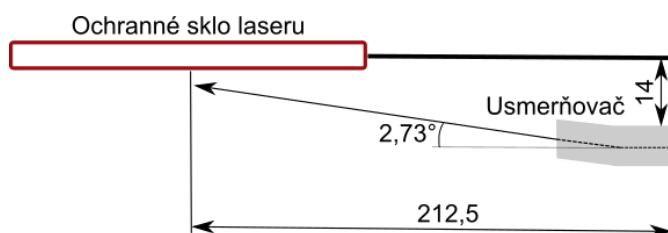


## 5.2 Návrh vrchného deflektoru prúdenia

Vrchný deflektor mal za úlohu smerovať prúdenie priamo na ochranné sklo laseru, aby nedochádzalo k usádzaniu splodín na jeho povrchu. Bol navrhnutý tak, aby bolo možné jeho vsadenie priamo do pôvodného vrchného distribútora prúdenia bez nutnosti používania spojovacieho materiálu (Obr. 5-15). Uhol natočenia deflektoru  $2,73^\circ$  bol určený na základe rozmerov komory a polohy ochranného skla laseru (Obr. 5-16).

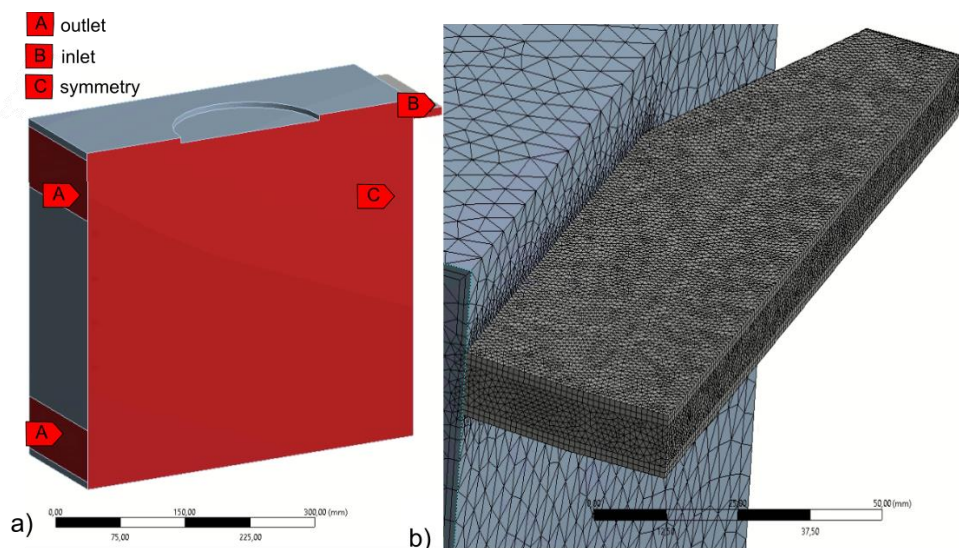


Obr. 5-15 Deflektor (biely) aj spolu s distribútorom v reze.



Obr. 5-16 Schéma určenia uhlu natočenia deflektoru.

Uhol natočenia bol následne overený pomocou CFD simulácií, kde boli sledované prúdnice vystupujúce z deflektoru. V simulácii bol uvažovaný spodný a vrchný výstup a vrchný deflektor. Výpočtová sieť mala rovnaký charakter ako predchádzajúce prípady (Obr. 5-17).



Obr. 5-17 a) nastavenie okrajových podmienok; b) použitá výpočtová sieť.

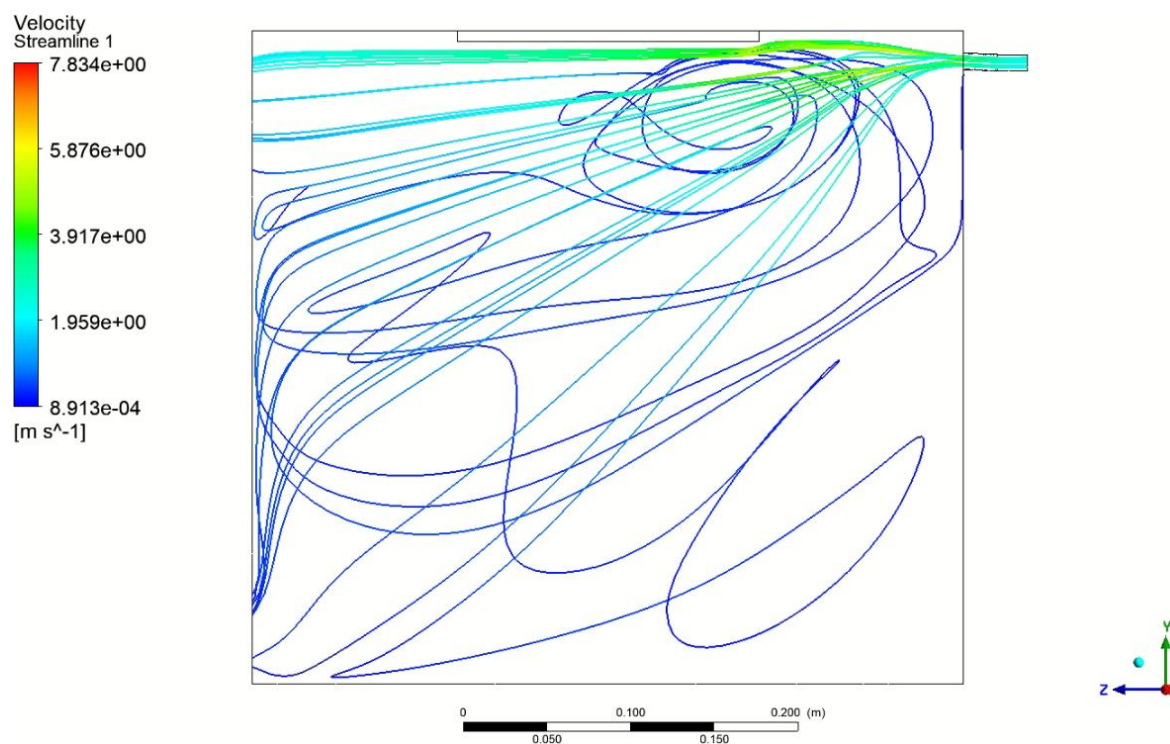
Na vstup bola použitá okrajová podmienka (velocity inlet) s 5 % intenzitou turbulencií, pričom rýchlosť  $2,21 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  na vstup bola zadaná na základe simulácie pôvodnej konfigurácie. Všetky ostatné okrajové podmienky sú uvedené v (Tab. 5-2).

Tab. 5-2 Okrajové podmienky použité pre simulácie.

Okrajové podmienky použité pre simulácie	
Ustálené prúdenie (Steady state)	–
Pressure based solver	–
Nestlačiteľné prúdenie	–
Vstupná rýchlosť (Velocity inlet)	$2,21 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Výstupný tlak (Pressure outlet)	0 Pa
Turbulentný model	k- $\epsilon$ realizable
Stenová funkcia	Standard wall function
Prúdiace médium	vzduch

Simulácia bola považovaná za skonvergovanú, keď reziduá klesli pod  $1\cdot 10^{-3}$ .

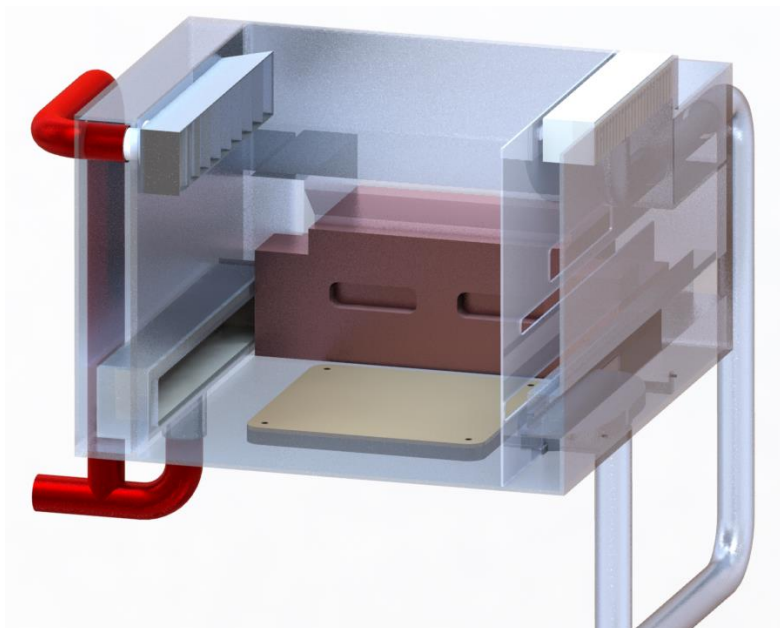
Výsledky simulácií ukazujú, že deflektor si plní svoju funkciu a dochádza k smerovaniu prúdenia na ochranné sklo laseru (Obr. 5-18).



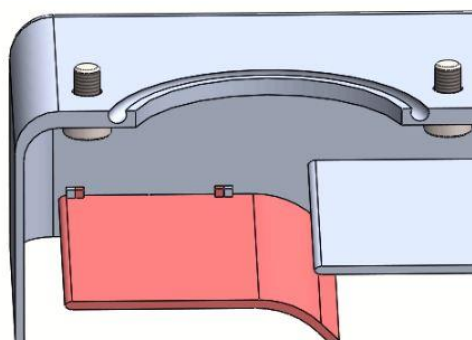
Obr. 5-18 Výsledky simulácie, kde je možné pozorovať, že majoritná časť prúdnic smeruje na ochranné sklo.

## 5.3 Návrh prídavného výstupu

Prídavný výstup je tvorený lamelami za pomoci ktorých bolo možné vytvoriť želané rýchlostné pole na výstupe. Celý návrh prebiehal pomocou iteračného procesu podobne ako v prípade návrhu spodného distribútora prúdenia, kde bola snaha o čo najrovnomernejšie rozdelenie prúdenia. Pri návrhu bol využitý otvor v bočnej stene tlačiarne. Upevnenie prídavného výstupu do stavebnej komory a prídavný potrubný systém je znázornený na (Obr. 5-19). Kvôli upevňovacím skrutkám bolo nutné spraviť jednu z lamiel demontovateľnú (Obr. 5-20). Zo spodnej časti je lamela pritláčaná skrutkou.



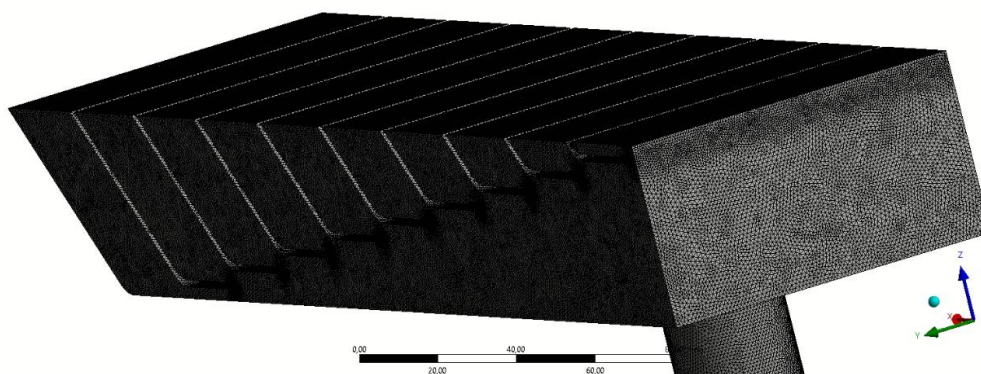
Obr. 5-19 Upevnenie prídavného výstupu s prídavným potrubím (červené).



Obr. 5-20 Demontovateľná lamela (červená), naznačené vymedzovacie zarážky.

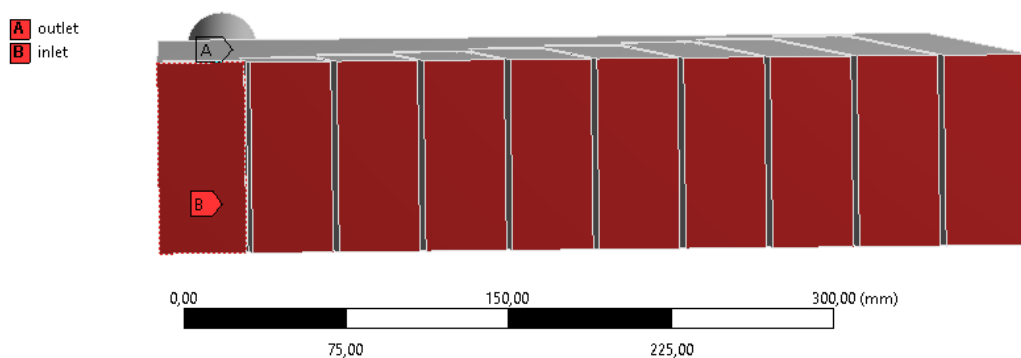
### 5.3.1 CFD simulácia

Výpočtová sieť mala rovnakú štruktúru ako predchádzajúce prípady bola tvorená štvorstenmi s 2 zjemňujúcimi vrstvami (Obr. 5-21).



Obr. 5-21 Výpočtová sieť prídavného odvodu.

Na vstup bola aplikovaná podmienka tlakový vstup (pressure inlet) a na výstup podmienka tlakový výstup (pressure outlet) (viď Obr. 5-22) s 5 % intenzitou turbulencií. Okrajové podmienky použité pre simulácie sú uvedené v (Tab. 5-3).

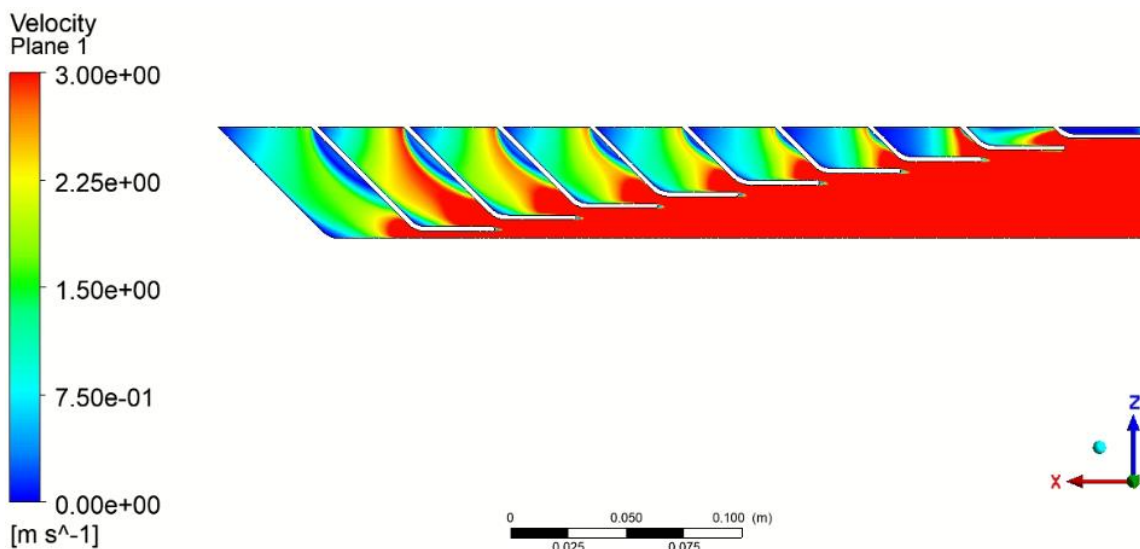


Obr. 5-22 Nastavenie okrajových podmienok.

Tab. 5-3 Okrajové podmienky použité pre simulácie prídavného výstupu.

Okrajové podmienky použité pre simulácie prídavného výstupu	
Ustálené prúdenie (Steady state)	–
Pressure based solver	–
Nestlačiteľné prúdenie	–
Vstupný tlak (Pressure inlet)	1250 Pa
Výstupný tlak (Pressure outlet)	750 Pa
Turbulentný model	k-ε realizable
Stenová funkcia	Scalable wall function
Prúdiace médium	vzduch

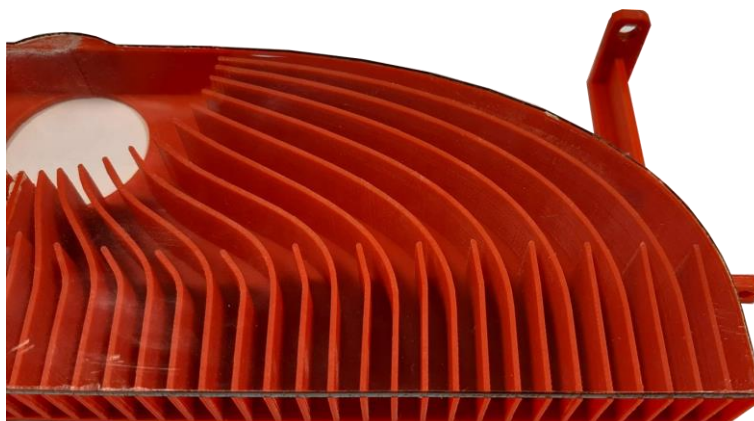
Konvergencia výsledku bola považovaná pri klesnutí reziduí pod  $1 \cdot 10^{-3}$ . Model prídavného výstupu prešiel postupnými úpravami geometrie, primárne lamiel, kde bolo variované s ich vzdialenosťou na základe sledovania kontúr rýchlosti v jeho centrálnej časti. Výška distribútora 70 mm, ktorá vyplynula z koncepčných riešení bola zachovaná. Výsledný model, kde sú zobrazené kontúry rýchlosti v jeho centrálnej časti je na (Obr. 5-23).



Obr. 5-23 Kontúry rýchlosti v centrálnej časti prídavného výstupu.

## 5.4 Výroba navrhnutých úprav

Na overenie funkčnosti navrhnutých súčiastok boli pre experimentálne merania použité modely vyrobené na FDM tlačiarni (Obr. 5-24 a Obr. 5-25). Vrchný deflektor a prídavný výstup bol vyrobený z materiálu PLA. Spodný distribútor, ktorý by mohol podliehať vyššej teplote od stavebnej platformy bol vyrobený z materiálu ABS.



Obr. 5-24 Detail spodného distribútora prúdenia.



Obr. 5-25 Navrhnuté komponenty z ABS a PLA nainštalované v komore.

## 5.5 Experimentálne overenie dosiahnutých parametrov

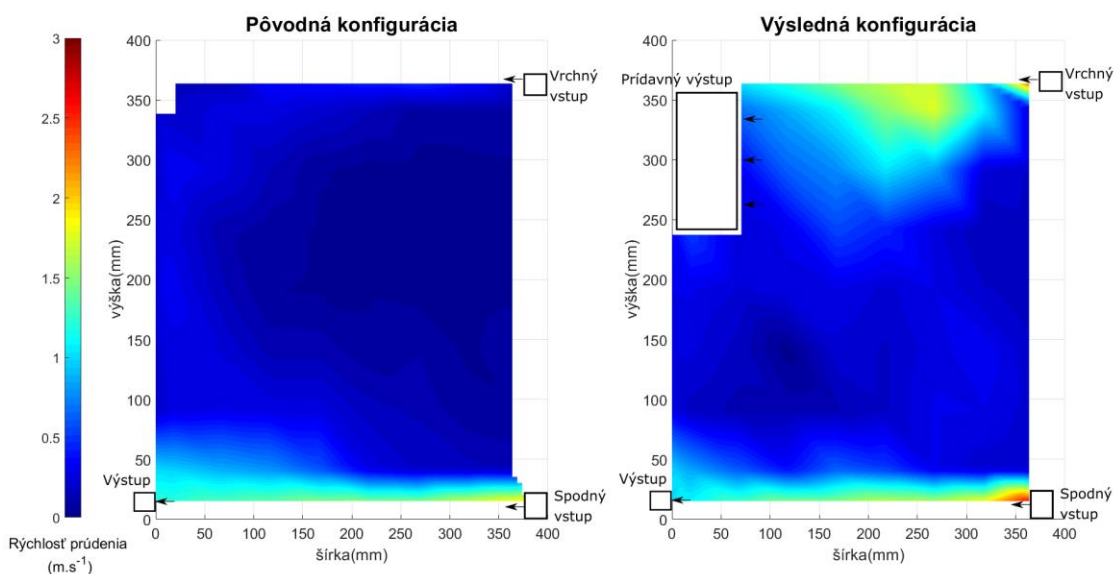
Na validáciu rozloženia rýchlosti v stavebnej komore bolo zrealizované experimentálne meranie rýchlosti prúdenia a na overenie zmeny porozity bola postavená testovacia stavba s rovnakými parametrami ako pri stavbe v pôvodnej konfigurácii stavebnej komory.

## 5.5.1 Meranie rýchlosti prúdenia

Na overenie kontúr rýchlosti bola meraná rýchlosť v jednotlivých bodoch stavebnej komory. V každom bode bola výsledná rýchlosť spriemerovaná z 10 sekúnd merania. V danom meraní sa celkovo jednalo o 244 bodov. Meranie prebiehalo pri identických podmienkach ako pri meraní pôvodnej konfigurácie. Pumpa bola nastavená na 75 % výkonu, rovnako ako v predchádzajúcom meraní pôvodnej konfigurácie. Experiment zahŕňal tri merania. Jednalo sa o meranie v rovine rovnobežnej so stavebnou platformou vo výške 12 mm nad stavebnou platformou. Ďalej prebehlo meranie vo vertikálnej rovine v centrálnej časti stavebnej komory, ktorého cieľom bolo zistiť rýchlosti vo vrchnej časti komory a rýchlosť prúdenia popod sklo laseru. Cieľom tretieho merania bolo zistiť funkčnosť prídavného odvodu splodín za pomoci merania rýchlosti prúdenia v stredoch segmentov prídavného výstupu.

### Výsledky merania vo vertikálnej rovine

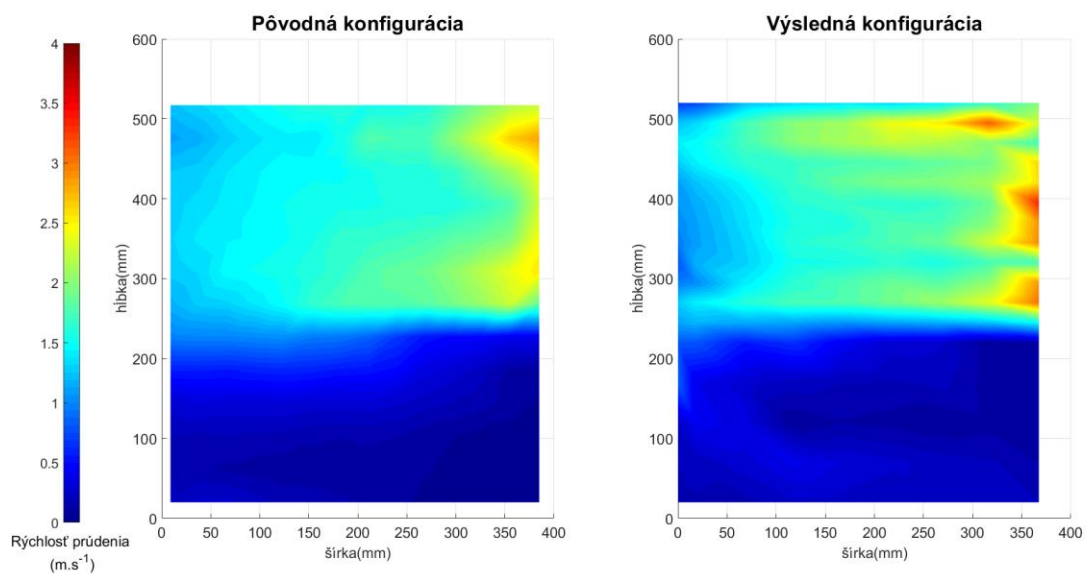
Výsledky merania vo vertikálnej rovine (Obr. 5-26) dokazujú navýšenie rýchlostí vo vrchnej časti stavebnej komory oproti pôvodnej konfigurácii až o  $0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Taktiež je možné pozorovať, že v ľavej časti komory došlo k redukcii vzniku recirkulácii prúdenia.



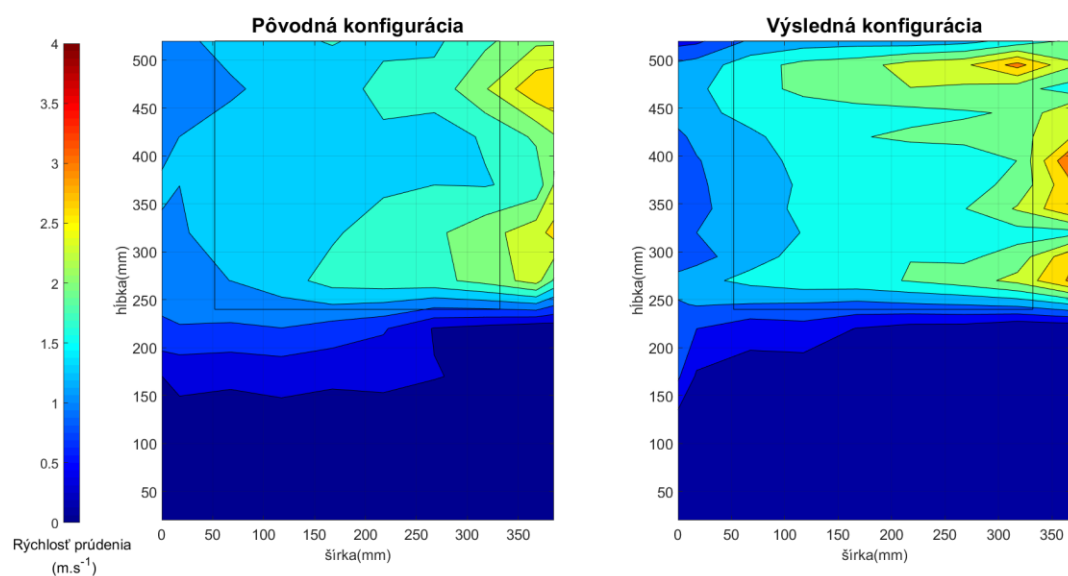
Obr. 5-26 Porovnanie výsledkov experimentálneho merania vo vertikálnej rovine (vyrezané časti predstavujú oblasti kde nebolo možné uskutočniť meranie pretože sa v danej oblasti nachádza prídavný výstup).

### Výsledky merania v horizontálnej rovine

Výsledky merania v horizontálnej rovine ukazujú navýšenie rýchlostí v centrálnej časti vstupu (Obr. 5-27). Došlo aj k miernemu rozšíreniu vyššej rýchlosti po šírke komory o približne 10 mm. Celkové navýšenie priemernej rýchlosti nad stavebnou platformou z  $1,63 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  v pôvodnej konfigurácii na  $1,78 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  po úpravách je zreteľnejšie pozorovateľné na (Obr. 5-28).



Obr. 5-27 Porovnanie výsledkov experimentálneho merania v horizontálnej rovine.

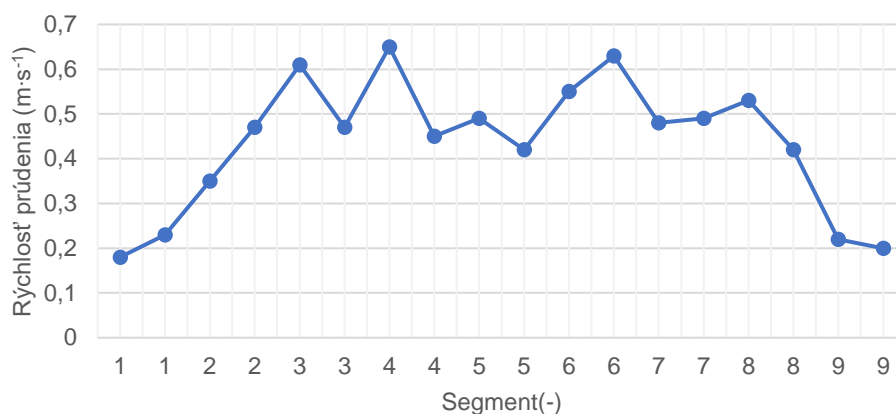


Obr. 5-28 Porovnanie kontúr rýchlostí experimentálneho merania v horizontálnej rovine s naznačenou stavebnou platformou.

### Výsledky merania prídavného výstupu

Na overenie funkčnosti prídavného výstupu bolo zrealizované meranie vo vzdialenosti 6 mm od výstupu v každom segmente na dvoch miestach. Výsledky merania ukazujú rýchlostný profil tesne pred výstupom (Obr. 5-29). Kde je možné pozorovať na jeho krajoch nižšie rýchlosti prúdenia a v centrálnej časti zvýšenie rýchlosti.

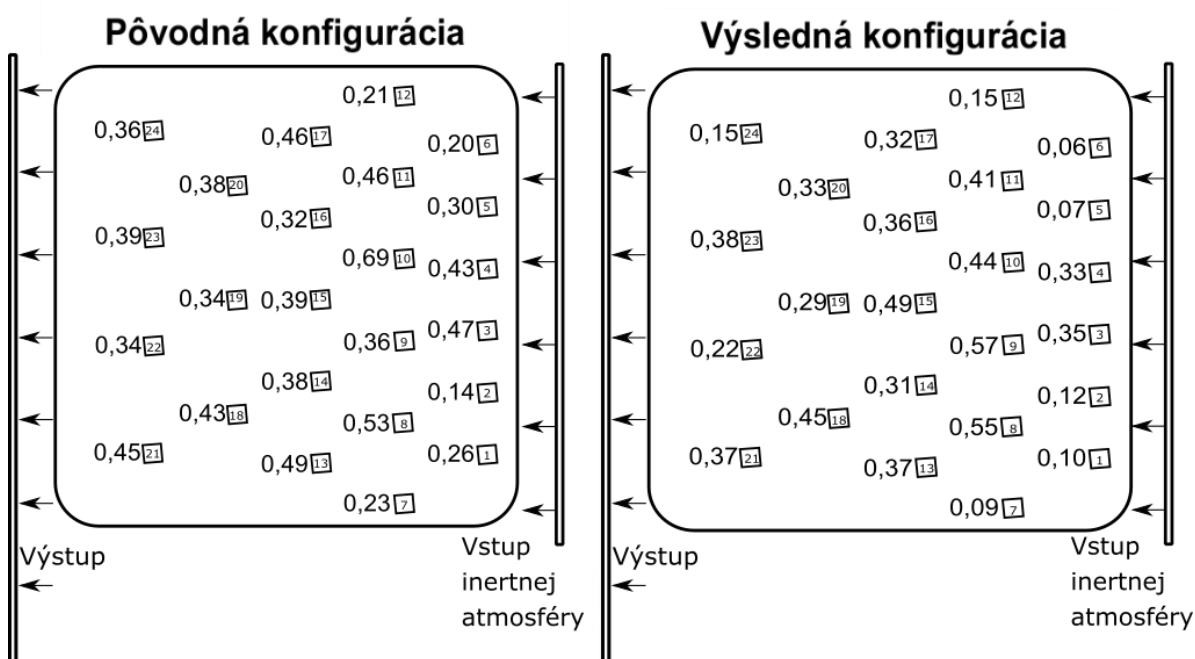




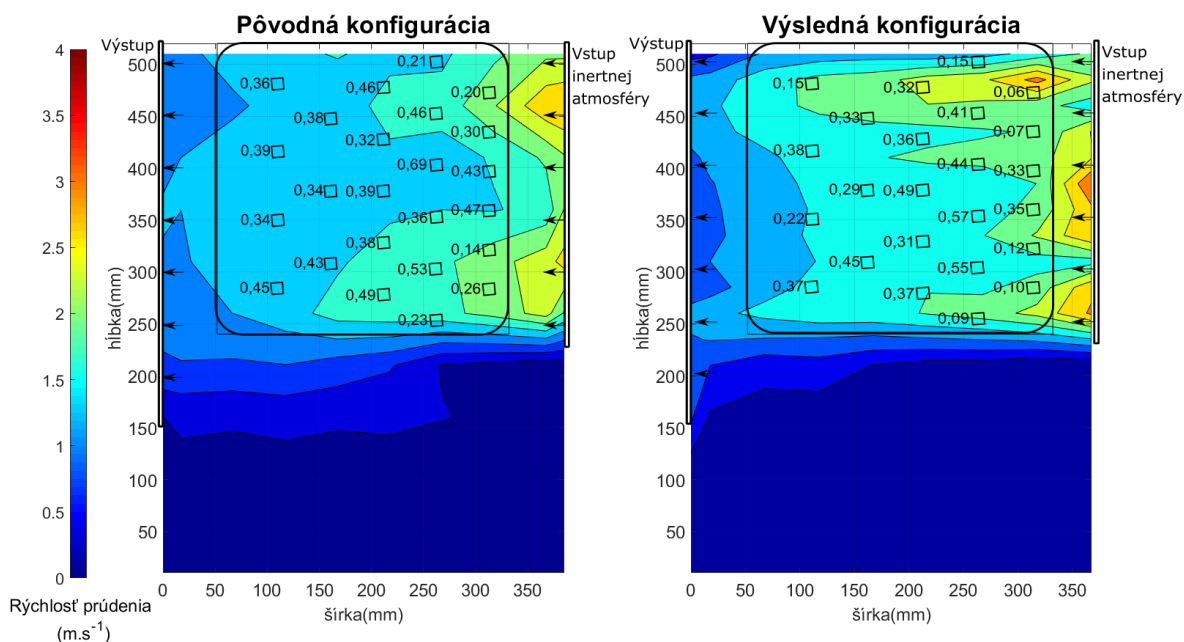
Obr. 5-29 Rýchlostný profil na prídavnom výstupe.

### 5.5.2 Korelácia porozity s rýchlosťou prúdenia

Navýšením rýchlostí v centrálnej časti vstupu sa podarilo docieľiť zníženie porozity u kociek č. 3 a 4 o hodnotu 0,12 % a 0,1 % (Obr. 5-30, Obr. 5-31). V daných prípadoch došlo k navýšeniu rýchlosti z 1,61 m·s<sup>-1</sup> na 1,99 m·s<sup>-1</sup> a z 1,66 m·s<sup>-1</sup> na 2,11 m·s<sup>-1</sup>. Taktiež je znateľné zníženie porozity u vzoriek 1, 2, 5, 6 kde došlo podobne k navýšeniu rýchlostí. Celkovo došlo vplyvom úprav k zníženiu priemernej porozity vzoriek o 0,08 %.



Obr. 5-30 Porovnanie porozít (porozita je uvedená vedľa kocky v (%)), (číslovanie kociek vo vnútri).



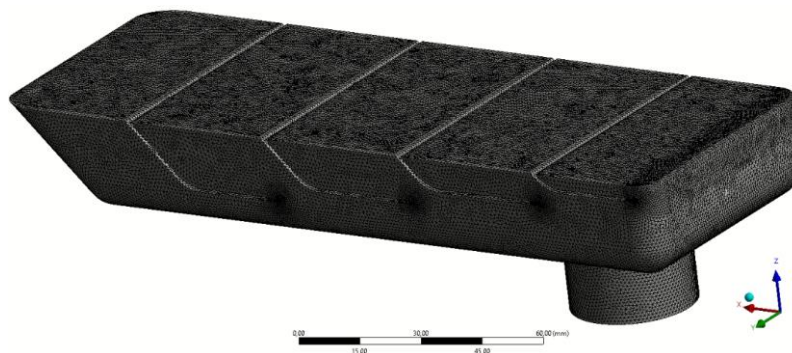
Obr. 5-31 Porovnanie korelácie porozity a rýchlosti prúdenia pôvodnej konfigurácie a výslednej konfigurácie.

## 5.6 Modifikácia prídavného výstupu

Po meraniach bolo zistené, že prídavný výstup síce plní svoju funkciu, ale v krajných lamelách došlo k prepadu v rýchlostiach až na  $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Pričom v centrálnej časti vstupu sa pohybovala rýchlosť okolo  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Ďalším dôvodom k modifikácii prídavného výstupu bolo čiastočné prekrytie jednej z kamier na sledovanie stavebného procesu.

Modifikácia spočívala v úprave dĺžky distribútora a zmeny rýchlostného profilu. Rýchlostný profil mal po modifikácii dosahovať najvyššej rýchlosti pri ochrannom skle lasera a postupne sa mala rýchlosť znižovať.

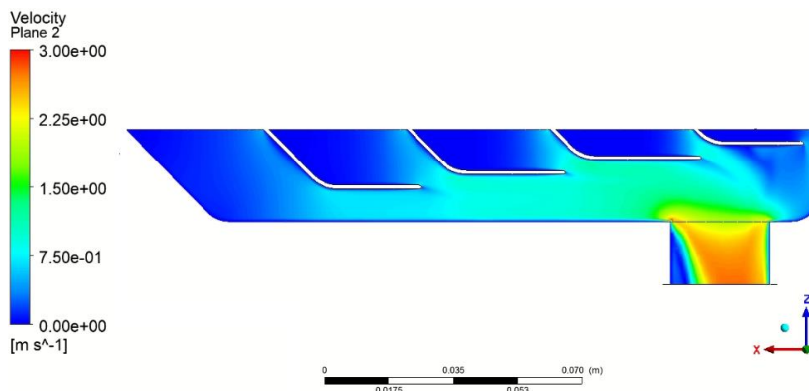
Úprava bola podrobená CFD simuláciám, kde sa postupnými iteráciami dospelo k finálnemu riešeniu. Výpočtová sieť aj okrajové podmienky mali zhodnú štruktúru s predchádzajúcim návrhom (viď Tab. 5-4 a Obr. 5-32).



Obr. 5-32 Výpočtová sieť.

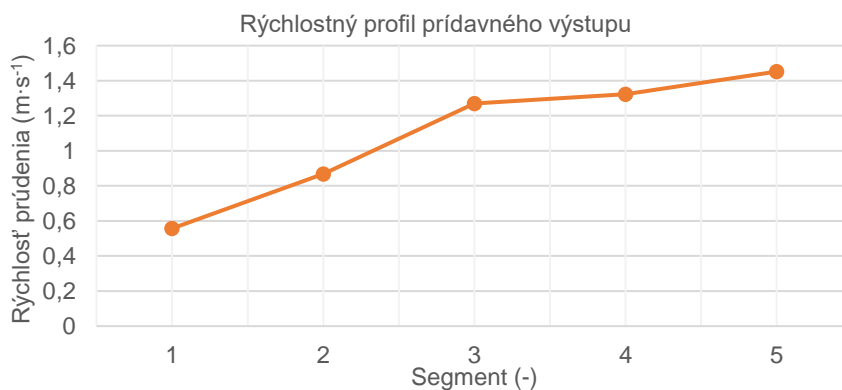
Tab. 5-4 Okrajové podmienky použité pre simulácie prídavného výstupu.

Okrajové podmienky použité pre simulácie prídavného výstupu	
Ustálené prúdenie (Steady state)	–
Pressure based solver	–
Nestlačiteľné prúdenie	–
Vstupný tlak (Pressure inlet)	1250 Pa
Výstupný tlak (Pressure outlet)	750 Pa
Turbulentný model	k-ε realizable
Stenová funkcia	Scalable wall function
Prúdiace médium	vzduch



Obr. 5-33 Kontúry rýchlostí.

Výsledky simulácie značia, že segment najbližšie ochranného skla laseru (segment č. 5) má najvyššiu rýchlosť s postupne klesajúcou tendenciou ďalej od ochranného skla laseru (viď Obr. 5-34).



Obr. 5-34 Priemerné rýchlosti na jednotlivých segmentoch prídavného výstupu.

## 5.7 Výroba navrhnutých komponentov

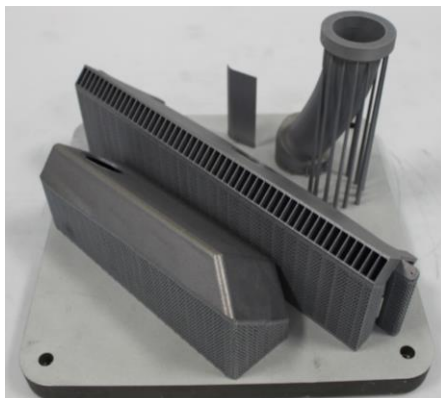
Na výrobu súčiastok, ktoré by mohli podliehať vyššiemu tepelnému namáhaniu a pri ktorých bolo potrebné zaručiť určitú mieru odolnosti voči opotrebeniu pri manipulácii bola použitá aditívna výroba technológiou SLM. Jedná sa o navrhnutý spodný distribútor prúdenia a prídavný výstup. Distribútor prúdenia bol na aditívnu výrobu koncipovaný z dvoch dôvodov, prvým sú tvarové možnosti, ktoré ponúka daná technológia a ďalším aspektom je vyššia teplota stavebnej platformy (150°C), ktorá sa môže vedením tepla prenášať na distribútor. Prídavný výstup bol vyrobený danou technológiou hlavne z dôvodu vyššej odolnosti a možnosti tvarovej variability pri návrhu. Vrchný usmerňovač prúdenia bol vyrobený pomocou FDM technológie z materiálu ABS, ktorý je schopný odolávať teplotám do 100°C. Teplota v stavebnej komore by nemala predstavovať riziko pre diel z ABS, pretože sa pohybuje okolo teploty 50°C.

### 5.7.1 Výroba

Po exporte súčiastok do formátu (.stl) bolo potrebné pripraviť podporné štruktúry pre výrobu. Stavba súčiastok trvala 20 hod, pričom počas stavby bolo potrebné dávať pozor na kritické miesta stavby, ktoré by mohli v dôsledku tenkých stien (1 mm) a teplotnej deformácie spôsobovať problémy pri nanášaní prášku. Takže v daných miestach bola zvolená pauza v rozmedzí 30 až 60 sekúnd medzi skenovaním, aby mohol diel schladnúť a aby sa predišlo jeho krúteniu a následným problémom pri nanášaní prášku.

### 5.7.2 Postprocessing

Zahrňal žihanie na zníženie vnútorného pnutia, odrezanie dielov z platformy a nasledovalo čistenie od podporných štruktúr a nakoniec boli oba diely opieskované. Do opieskovaných súčiastok boli vyrezané závitky a vložené tesnenia o priemere 2 mm (vid' Príloha C Obr. 12-3, Obr. 12-4, Obr. 12-5, Obr. 12-6).



Obr. 5-35 Postavené diely s podporami na stavebnej platforme.

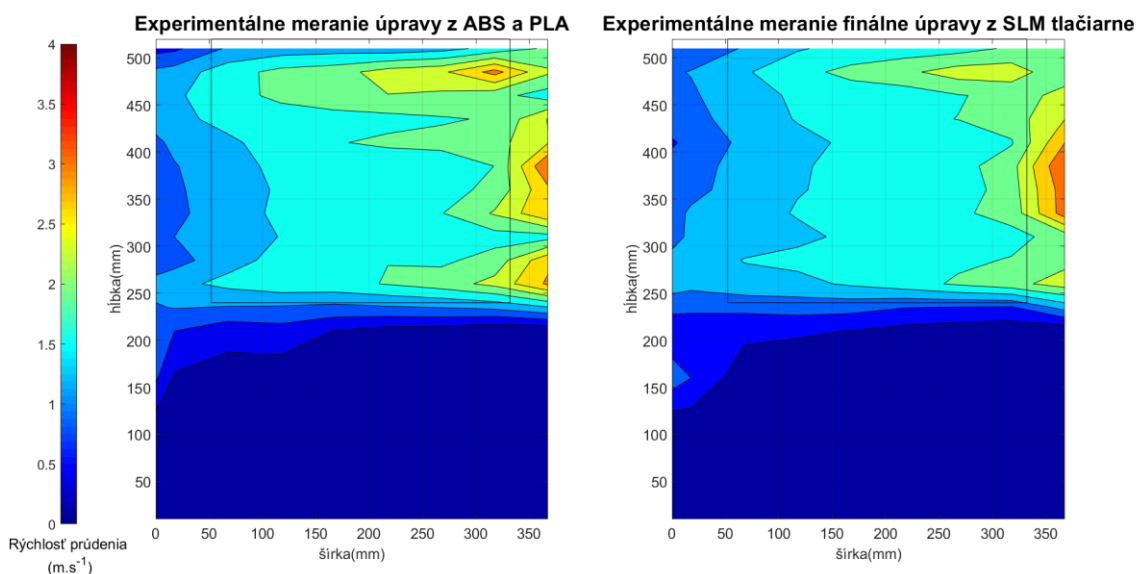
## 5.8 Experimentálne overenie parametrov dosiahnutých na súčiastkach vyrobených na SLM tlačiarňi

Prebehlo na validáciu rýchlostného poľa v horizontálnej a vertikálnej rovine. Ďalej prebehlo experimentálne meranie rýchlostného profilu prídavného výstupu. Test zahŕňal aj pripojenie výkonnejšej pumpy a jej následné experimentálne overenie. Posledná séria testov sa skladala zo sledovania kondenzátu a splodín pomocou video záznamu z ktorého bolo následne možné vyhodnotiť tvorbu a odnášanie kondenzátu a splodín preč zo stavebnej komory.

### 5.8.1 Meranie rýchlosti prúdenia pôvodná pumpa

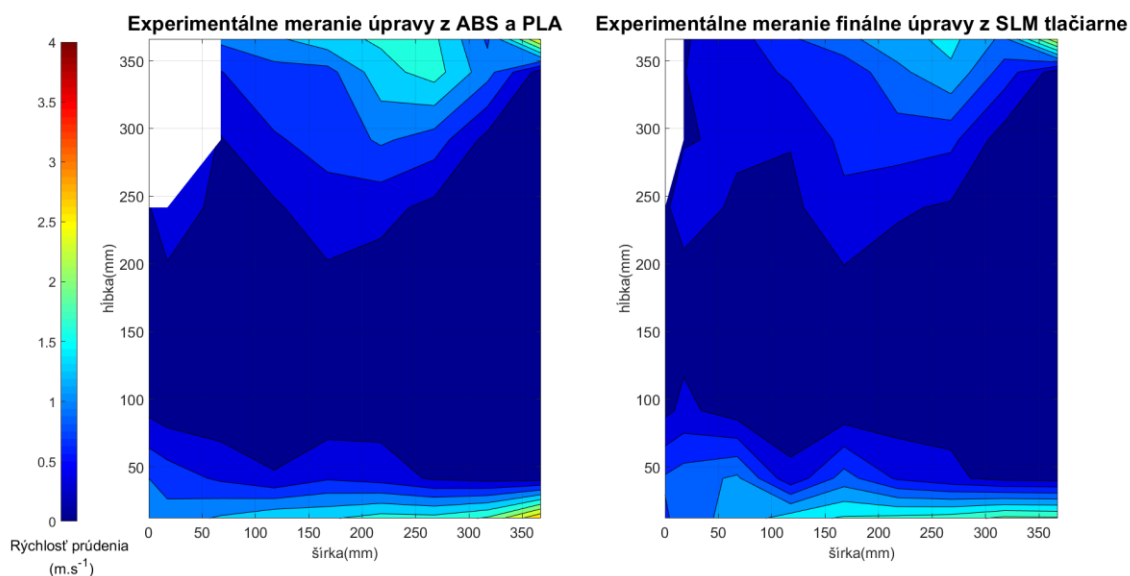
Validácia prebehla na overenie funkčnosti dielov vyrobených na SLM tlačiarňi. Experimentálne meranie rýchlosti malo rovnaký postup ako v predchádzajúcich testoch.

Porovnanie rýchlostných polí pri 75 % výkone pumpy s využitím dielov vyrobených na FDM tlačiarňi a finálnych dielov vyrobených na SLM tlačiarňi v horizontálnej rovine (viď Obr. 5-36). Z porovnania sú viditeľné len minimálne zmeny v rýchlostnom poli, ktoré môžu byť pripísané nepresnostiam vzniknutých pri meraní a vyššej drsnosti povrchu pri dieloch vyrobených na SLM tlačiarňi, hlavne na neopracovaných plochách ktoré sa nachádzajú vo vnútornej časti distribútora.



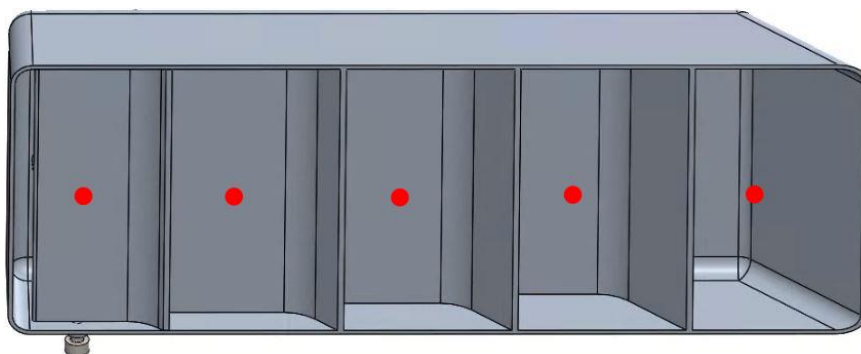
Obr. 5-36 Porovnanie nameraných rýchlostí pri úpravách vyrobených na FDM tlačiarňi (vľavo), a vyrobených na SLM tlačiarňi (vpravo).

Porovnanie rýchlostných polí vo vertikálnej rovine je znázornené na (Obr. 5-37). Mierne odlišnosti nastali vo vrchnej časti komory ale charakter rýchlostného poľa ostal nezmenený. Dané rozdiely by nemali spôsobovať takmer žiadne zmeny pri odvádzaní kondenzátu.

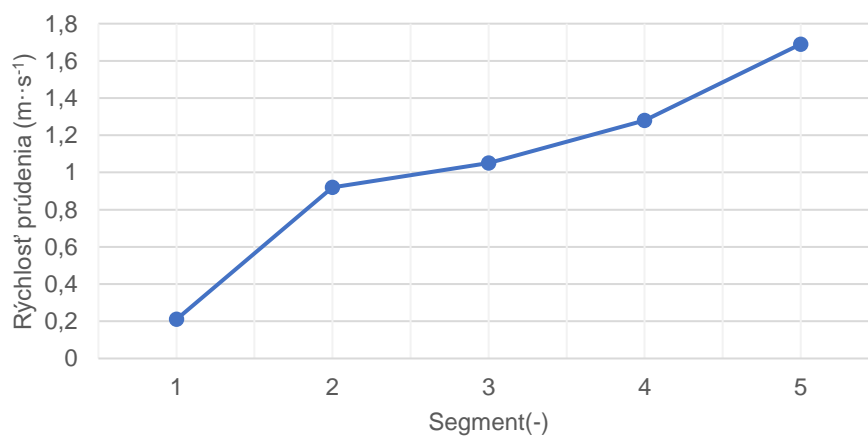


Obr. 5-37 Porovnanie nameraných rýchlostí pri úpravách vyrobených na FDM tlačiarne (vľavo), a vyrobených na SLM tlačiarne (vpravo).

Rýchlostný profil prídavného výstupu bol meraný v stredoch prídavného výstupu (viď Obr. 5-38). Výsledok merania je znázornený na (Obr. 5-39). Je na ňom možné pozorovať stúpajúcu tendenciu smerom k ochrannému sklu čo bol žiadaný efekt prídavného výstupu.



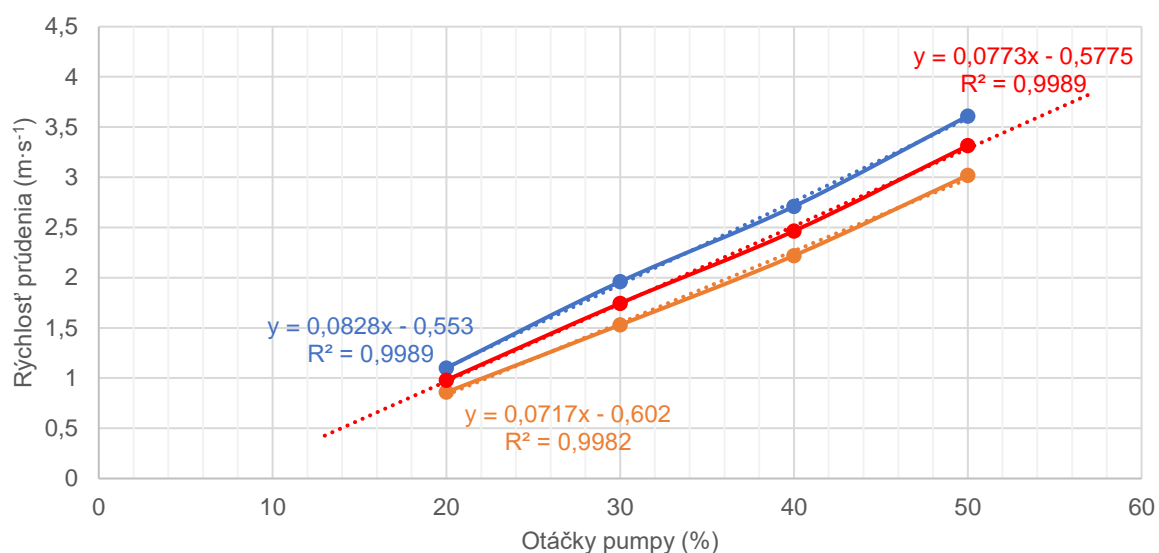
Obr. 5-38 Miesta kde prebiehalo meranie rýchlostného profilu.



Obr. 5-39 Rýchlostný profil prídavného výstupu.

## 5.8.2 Test s výkonnejšou pumpou

Z experimentálnych meraní sa ukázalo, že pozitívny vplyv na porozitu súčiastky mala vyššia rýchlosť prúdenia tesne ponad stavebnú platformu. Preto prebehol test s výkonnejšou pumpou (viď parametre pumpy Príloha B, Tab. 12-2). Po inštalácii pumpy a prvotnom teste nasledovalo zistenie výkonovej charakteristiky pumpy. Meranie výkonovej charakteristiky výkonnejšej pumpy prebehlo na overenie v dvoch bodoch pri 4 výkonoch pumpy (viď Obr. 5-40).



Obr. 5-40 Závislosť otáčok pumpy na rýchlosti prúdenia v stavebnej komore (červené hodnoty tvoria priemer).

Z merania vyplynulo, že závislosť otáčok pumpy na rýchlosti prúdenia má takmer lineárnu charakteristiku.

Medzi filtrom a pumpou sa nachádza tlakový senzor, ktorým je možné sledovať stav filtrov. Pri veľmi nízkej hodnote podtlaku pod -60 mbar systém zastaví proces výroby. Preto bol vykonaný test pri ktorom sa postupne navyšovali hodnoty výkonu pumpy od 20 % do 70 % výkonu (Tab. 5-5).

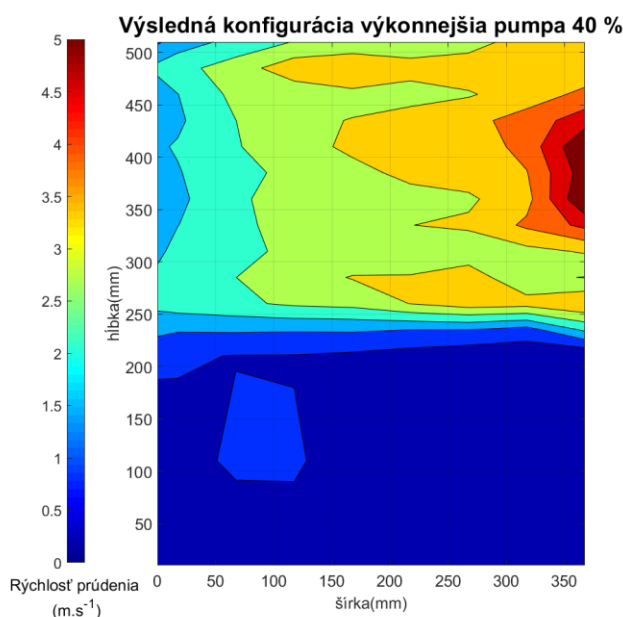
Tab. 5-5 Podtlak medzi filtrom a pumpou v závislosti na výkone pumpy.

Výkon pumpy (%)	20	30	40	50	60	70
Podtlak medzi filtrom a pumpou (mbar)	-4,2	-13,5	-29,3	-44,5	-65,9	-79,5

Z testu vyplynulo, že bežne použiteľný výkon sa bude s daným usporiadaním pohybovať približne do 50 % výkonu pumpy.

## Meranie rýchlosti prúdenia s výkonnejšou pumpou

Meranie prebehlo za účelom zistenia rýchlostného poľa pri navýšení výkonu pumpy. Z nameraných rýchlostí vyššie bolo možné určiť, že zaťaženiu pôvodnej pumpy na 95 % odpovedá 30 % výkon pumpy výkonnejšej. Na základe vyššie uvedených meraní tlaku bolo zvolené navýšenie výkonu o 10 %. Meranie teda prebiehalo pri 40 % výkone pumpy. Na rýchlostnom poli môžeme pozorovať, že charakter distribúcie prúdenia ostal aj pri navýšení výkonu takmer rovnaký (viď Obr. 5-41).

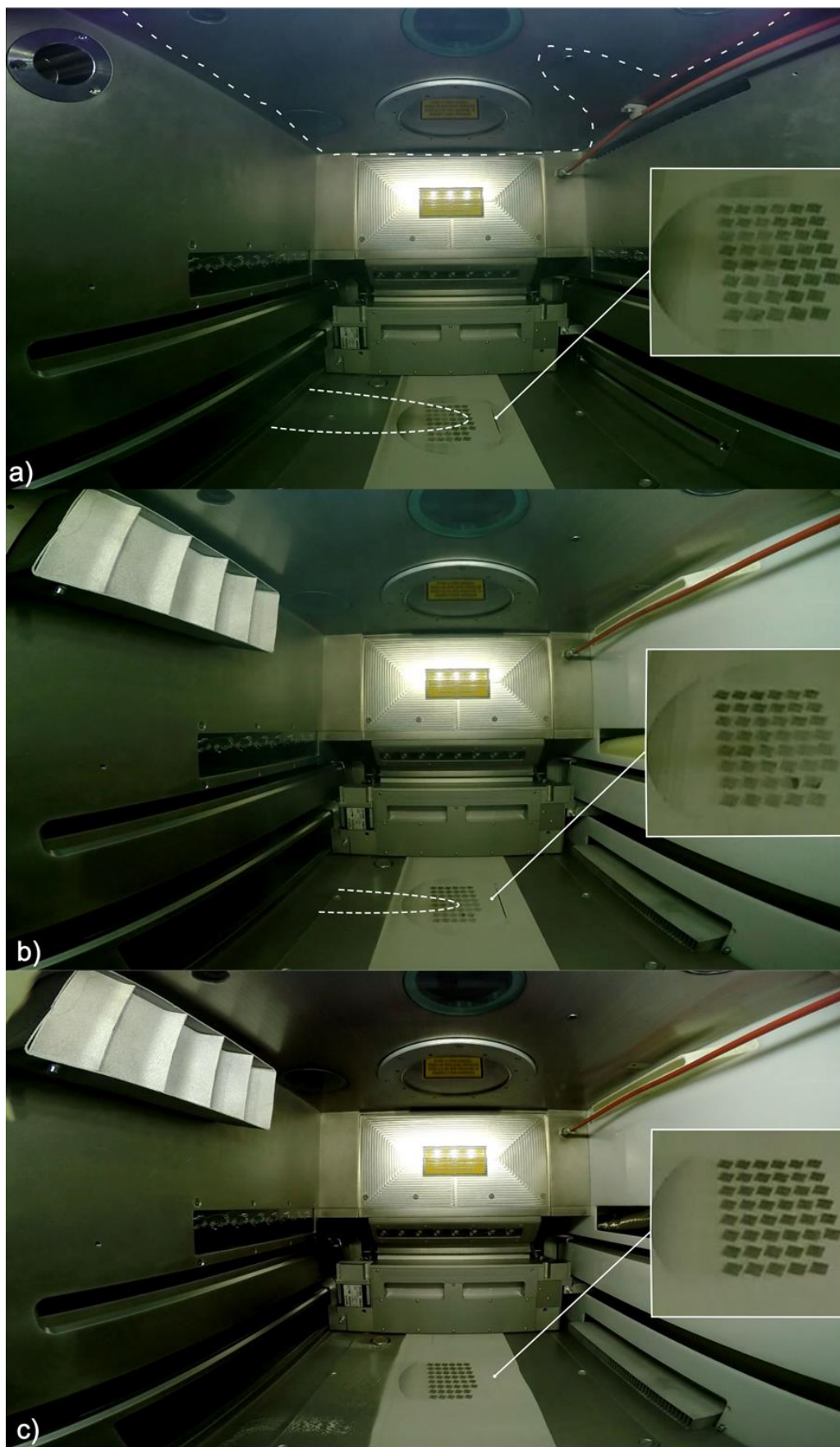


Obr. 5-41 Rýchlostné pole s výkonnejšou pumpou pri 40 % výkone.

### 5.8.3 Test odvádzania kondenzátu

K enormnej tvorbe kondenzátu dochádza najvýraznejšie pri použití horčikových zliatín. Nasledovný test mal overiť efekt úprav na jeho odvádzanie z objemu stavebnej komory. Na experiment bol použitý horčikový materiál (WE43 povlakovaný fluórom). Test prebiehal pri výkone pôvodnej pumpy nastavenom na 75 % s pôvodnou konfiguráciou, ďalej pri výkone pôvodnej pumpy nastavenom 75 % s navrhnutými úpravami a posledný test prebehol s navrhnutými úpravami a s výkonnejšou pumpou nastavenou na 40 % výkonu (čo predstavuje navýšenie rýchlostí o približne 44 %). Všetky testy prebiehali pri identickom obsahu kyslíka, ktorý sa pohyboval na úrovni 0,08 %. Výsledky z videozáznamu sú zaznamenané z identickej oblasti a času pričom ukazujú, že po úpravách nedochádzalo k tak enormnej tvorbe kondenzátu (viď Obr. 5-42 b)), čo je možné pozorovať aj na stavebnej platforme kde došlo k minimalizácii tmavej oblasti kde dochádza k rozstrekovaniu častíc. Po navýšení výkonu je na (Obr. 5-42 c)) možné pozorovať takmer úplné odstránenie kondenzátu spod ochranného skla laseru a zároveň došlo aj k vymiznutiu oblasti v ktorej dochádza k rozstrekovaniu častíc na stavebnej platforme.





Obr. 5-42 Porovnanie odvádzania kondenzátu: a) pred úpravami 75 % výkon pôvodnej pumpy, b) po úpravách 75 % výkon pôvodnej pumpy, c) po úpravách výkonnejšia pumpa 40 % výkonu.

## 6 DISKUSIA

K návrhu úpravy cirkulačného okruhu inertnej atmosféry bolo potrebné zistiť charakter prúdenia v stavebnej komore a overiť koreláciu rýchlostného poľa s porozitou dielov na rôznych miestach stavebnej platformy. Ako prvé bolo potrebné zistiť výšku v ktorej je možné zachytiť čo najširšie spektrum rýchlostného poľa nad stavebnou platformou. Výška 42 mm nad stavebnou platformou nevykazovala spektrum rýchlostí, ktoré by bolo možné korelovať s porozitou vzoriek (maximálna rýchlosť sa pohybovala do  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Výška 12 mm predstavovala najnižšiu úroveň pri ktorej bolo možné experimentálne meranie rýchlostného poľa za pomoci dostupného anemometra (priemer sondy 12 mm), pretože v danej výške došlo k zníženiu sondy až na úroveň hrany prednej steny stavebnej komory. Podobné meranie na stroji ReaLizer SLM250 realizoval aj Ferrar [4] kde zistil, že výška 10 mm v danom stroji vykazuje veľmi dobrú koreláciu s porozitou vzoriek na stavebnej platforme (Pearsonov korelačný koeficient bol 0,84). Napriek tomu, že sa jednalo o rozdielny stroj, tak korelácia vo výške 12 mm bola na základe hodnotenia porozity a experimentálneho merania potvrdená. Bolo zistené, že korelácia porozity a rýchlosti prúdenia sa začínala markantnejšie prejavovať pri rozdieloch v rýchlosti prúdenia nad  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Z charakteru rýchlostného poľa nad stavebnou platformou bolo následne možné vyčítať oblasti kde dochádzalo k prepadu v rýchlosti o viac ako  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Táto oblasť bola lokalizovaná ako centrálna časť pôvodného distribútora prúdenia. Z merania vo vertikálnej rovine bolo možné pozorovať nízke rýchlosti (pod  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) v oblasti pod ochranným sklom laseru a mierny efekt recirkulácie prúdenia v stavebnej komore.

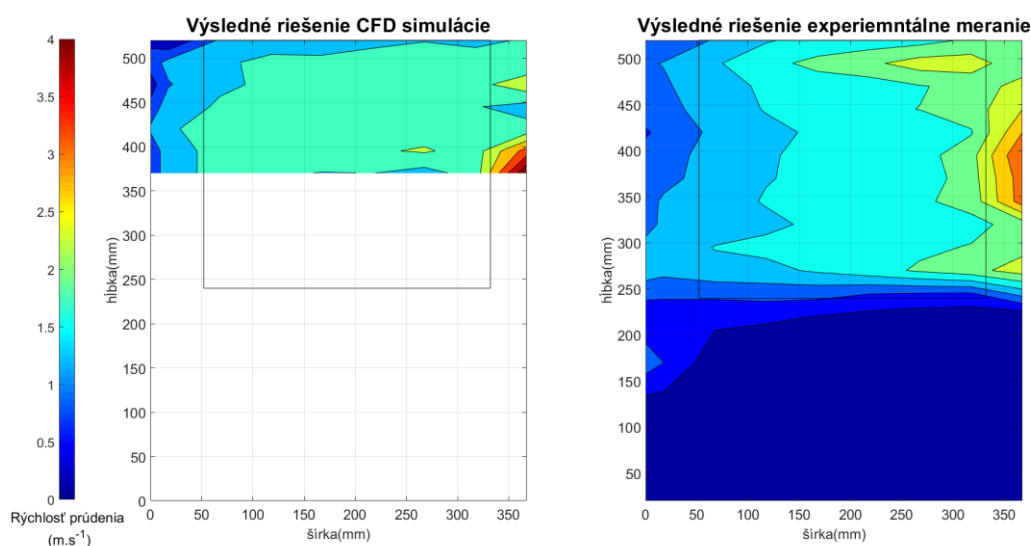
Pri porovnaní CFD simulácií a experimentálnych meraní rýchlostného poľa pôvodnej konfigurácie v horizontálnej rovine došlo k určitým odchýlkam no charakter rýchlostného poľa ostal takmer identický s meraním. Odchýlky ku ktorým došlo boli pravdepodobne spôsobené zmenami v geometrii (odstránenie malých hrán, výstupkov a spojovacieho materiálu v stavebnej komore). Aby výpočet zvládala dostupná výpočtová technika, tak boli vyššie uvedené zmeny nutnosťou. Pri porovnaní vo vertikálnej rovine rovnako došlo k určitým odchýlkam spôsobených vyššie uvedenými zmenami geometrie a zároveň vo vertikálnej rovine dochádza aj k značnej zmene smeru prúdenia, čo taktiež narušuje presnosť merania. Termálny anemometer je určený na meranie usmerneného prúdenia a sonda je tvorená tenkým drôtom chráneným vidlicou z plastu. Ochranná klietka sondy môže spôsobovať určitú mieru nepresnosti v meraní pri nenatočení sondy v smere prúdnic.

Na základe lokalít zo zníženou rýchlosťou prúdenia bol navrhnutý spodný distribútor prúdenia, vrchný deflektor prúdenia a prídavný výstup. Pri návrhu spodného distribútora bolo cieľom dosiahnuť vyššie rýchlosti v centrálnej časti vstupu čo sa podarilo dosiahnuť pomocou CFD simulácií, kde bolo sledované rozloženie rýchlostí na platforme a zároveň boli sledované aj priemerné rýchlosti na výstupoch z distribútora pomocou ktorých bolo možné stanoviť ukončenie optimalizácie návrhu.

Po experimentálnom overení navrhnutých úprav bolo zistené, že došlo k zníženiu porozity na väčšine vzoriek. Avšak predpoklad výrazného zníženia porozity v centrálnej časti vstupu nebol až tak markantný napriek navýšeniu rýchlostí z hodnoty  $1,66 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  na  $2,11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a z hodnoty  $1,61 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  na  $1,99 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . V centrálnej časti došlo k zníženiu porozity o 0,1 % a o 0,13 %. Pre porovnanie s krajnými vzorkami, kde došlo k navýšeniu rýchlostí z  $2,04 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  na  $2,11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  pri znížení porozity o 0,16 % a pri druhej krajnej vzorke došlo k navýšeniu rýchlostí z  $2,01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  na  $2,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a zníženiu porozity o 0,14 %. Keďže treba počítať s prejazdom nanášača prášku na druhú stranu platformy, tak je možné vyššie uvedené hodnoty spriemerovať. Z priemerných hodnôt vyplýva, že v centrálnej časti vstupu kde došlo po úprave o navýšenie rýchlosti o  $0,42 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  došlo k zníženiu porozity o 0,12 % pričom v krajných bodoch došlo o navýšenie rýchlosti o  $0,66 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  pri znížení porozity o 0,15 %, čo sa dá považovať za prijateľné zmeny porozity. Zmeny porozity v nasledujúcich radách po šírke nie sú až tak výrazné hlavne z dôvodu rovnomernejšieho rozloženia rýchlostí vo väčšej vzdialenosti od vstupu.

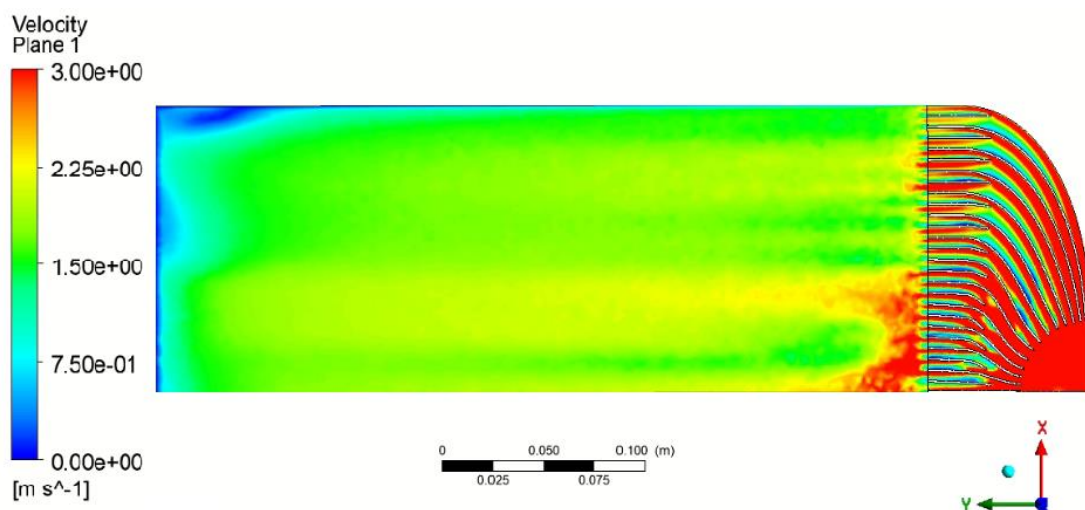
Z meraní pred aj po úpravách teda vyplýva závislosť medzi prúdením a porozitou súčiastky. K výraznejšiemu zníženiu porozity na okrajoch platformy oproti centrálnej časti mohol prispieť aj fakt, že prúdenie v krajných segmentoch malo niekoľko krát väčšiu dĺžku na rozvinutie symetrického profilu po výške a aj po šírke jedného segmentu. Na konci krajných segmentov bolo prúdenie oveľa rovnomernejšie čo pravdepodobne spôsobilo markantnejšie zníženie porozity.

Návrh spodného distribútora prúdenia prebiehal ako symetrický prípad z dôvodu šetrenia prvkov výpočtovej siete, ktoré následne umožnilo vykonať výpočet. Porovnanie simulačných modelov výslednej konfigurácie s experimentálnym meraním (vid' Obr. 6-1).



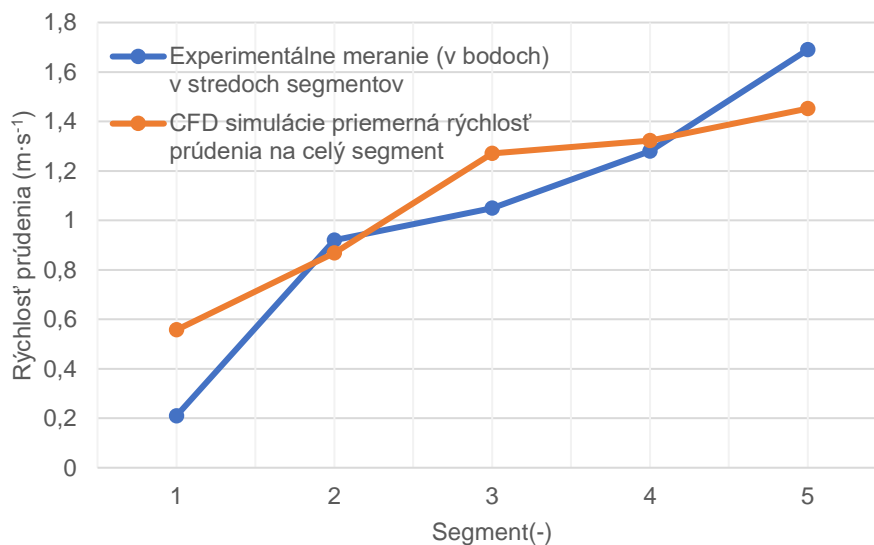
Obr. 6-1 Porovnanie CFD simulácií a experimentálnych meraní.

Porovnanie uvedené vyššie môže byť značne skresľujúce hlavne z dôvodu presnosti nastavenia polohy sondy v stavebnej komore. Pretože kontúry rýchlostí na (Obr. 6-1) sú tvorené z jednotlivých bodov vyexportovaných z programu Ansys Fluent. Na (Obr. 6-2) sú kontúry rýchlostí priamo zo simulácií. Na ktorých je pozorovateľná zhoda s experimentálnym meraním. Je na nich možné pozorovať, že v centrálnej časti sa nachádza miesto s vyššou rýchlosťou a rovnako dochádza k miernemu zvýšeniu rýchlostí aj pri okraji stavebnej platformy. Dané lokality sa prejavili aj pri experimentálnom meraní (viď Obr. 6-1).



Obr. 6-2 CFD simulácia výsledného riešenia.

Cieľom porovnania rýchlostného profilu na prídavnom výstupe bolo porovnať trend rýchlostí, čo sa podarilo a pri CFD simulácií aj experimentálnom meraní je možné pozorovať stúpajúcu tendenciu smerom k ochrannému sklu laseru (viď Obr. 6-3) (segment č. 5 sa nachádza bližšie ochrannému sklu laseru).



Obr. 6-3 Rýchlostný profil na prídavnom výstupe.

## 7 ZÁVER

Cieľom tejto diplomovej práce bolo navrhnúť, vyrobiť a experimentálne overiť konštrukčnú úpravu recirkulačného okruhu inertnej atmosféry, ktorá zaistí efektívny odvod kondenzátu a splodín zo stavebnej komory. V rešeršnej časti bola zistená možnosť korelácie porozity súčiastky s rýchlosťou prúdenia. Ďalej bol spracovaný prehľad konštrukčných zmien, ktoré mali vplyv na rovnomernosť prúdenia.

Experimentálnym meraním rýchlostného poľa 12 mm nad stavebnou platformou a testom porozity bol potvrdený vplyv rýchlosti prúdenia na porozitu pri rozdieloch v rýchlostiach prúdenia viac ako  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Na základe experimentálneho merania rýchlostného poľa a CFD simulácií boli lokalizované miesta so zníženou rýchlosťou prúdenia, ktoré sa nachádzali v centrálnej časti vstupu.

Návrh sa zameriaval primárne na spodný distribútor prúdenia, ktorý má najmarkantnejší vplyv na rovnomernosť prúdenia nad stavebnou platformou. Pri návrhu sa podarilo znížiť fluktuácie rýchlostí medzi primárnymi segmentami na  $0,68 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  čo predstavuje zníženie o 82 % v porovnaní s pôvodnou konfiguráciou, kde dosahovali fluktuácie hodnôt až  $3,84 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Danými zmenami sa podarilo navýšiť priemernú rýchlosť nad stavebnou platformou z  $1,63 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  v pôvodnej konfigurácii na  $1,78 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  čím sa dosiahlo zníženie priemernej porozity o 0,08 %. Následne prebehol aj test odvádzania kondenzátu s použitím horčíkového materiálu (WE43), kde bolo potvrdené zlepšenie oproti pôvodnej konfigurácii. Test sa realizoval aj pri inštalácii výkonnejšej pumpy. Potvrdil, že pri vyššej rýchlosti prúdenia nedochádza k pozorovateľnej tvorbe kondenzátu.

Navrhnuté úpravy vykazujú zlepšenie v distribúcii prúdenia, ktoré bolo potvrdené pomocou experimentálnych meraní rýchlostného poľa, porozity a aj testov s horčíkovým materiálom. Dané zlepšenia znamenajú posun pri využívaní horčíkových materiálov, keďže sa podarilo eliminovať tvorbu kondenzátu na minimum, čo umožní rozšírenie spektra bežne využívaných materiálov. Na základe vyššie uvedených návrhov a experimentov boli všetky ciele práce splnené.

## 8 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] *SLM-solutions.com*. Dostupné z: <https://slm-solutions.com>
- [2] LADEWIG, Alexander, Georg SCHLICK, Maximilian FISSER, Volker SCHULZE a Uwe GLATZEL. Influence of the shielding gas flow on the removal of process by-products in the selective laser melting process. *Additive Manufacturing*. 2016, roč. 10, s. 1–9. ISSN 22148604.
- [3] HRDONKA, Štěpán, Filip JENIŠ, Lukáš MĚCHURA a Vít ŠREIBR. *KONSTRUKČNÍ ÚPRAVA ROZVODU INERTNÍ ATMOSFÉRY SLM 280HL*. 2017.
- [4] FERRAR, B., L. MULLEN, E. JONES, R. STAMP a C. J. SUTCLIFFE. Gas flow effects on selective laser melting (SLM) manufacturing performance. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012, roč. 212, č. 2, s. 355–364. ISSN 09240136.
- [5] SPIERINGS, A. B., K. WEGENER a G. LEVY. Designing material properties locally with additive manufacturing technology SLM. *23rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2012*. 2012, s. 447–455.
- [6] ABOULKHAIR, Nesma T., Nicola M. EVERITT, Ian ASHCROFT a Chris TUCK. Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive Manufacturing*. 2014, roč. 1, s. 77–86. ISSN 22148604.
- [7] *Becker-international*. Dostupné z: [https://www.becker-international.com/index.php?id=9336&lang=002&func=&list=&shop\\_obj=&shop\\_index=](https://www.becker-international.com/index.php?id=9336&lang=002&func=&list=&shop_obj=&shop_index=)
- [8] EOS. *Eosint M 280*. 2014. Dostupné z: [http://www.eos.info/systems\\_solutions/metal/systems\\_equipment/eosint\\_m280](http://www.eos.info/systems_solutions/metal/systems_equipment/eosint_m280)
- [9] WANG, Di, Shibiao WU, Fan FU, Shuzhen MAI, Yongqiang YANG, Yang LIU a Changhui SONG. Mechanisms and characteristics of spatter generation in SLM processing and its effect on the properties. *Materials and Design*. 2017. ISSN 18734197.
- [10] ANWAR, Ahmad Bin. Effect Of Inert Gas Flow Velocity And Unidirectional Scanning On The Formation And Accumulation Of Spattered Powder During Selective Laser Melting. 2017, č. January 2016.
- [11] ANWAR, Ahmad Bin a Quang Cuong PHAM. Selective laser melting of AlSi10Mg: Effects of scan direction, part placement and inert gas flow velocity on tensile strength. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017, roč. 240, s. 388–396. ISSN 09240136.
- [12] KONG, Chang Jing, Christopher J. TUCK, Ian A. ASHCROFT, Ricky D. WILDMAN a Richard HAGUE. High density Ti6Al4V via SLM processing: Microstructure and mechanical properties. *22nd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2011*. 2011, s. 475–483.
- [13] STEIDL, Hanuš, Lubomír NEUŽIL, Ivan FOŘT a Jiří VLČEK. *Úvod do proudění tekutin a sdílení tepla*. 1975.

- [14] JAROSLAV JANALÍK, PROF., ING., CSc. *Vybrané kapitoly z mechaniky tekutin*. Ostrava: VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA 17. listopadu 15/2172 708 33 Ostrava-Poruba, 2008. ISBN 978-80-248-1910-5.
- [15] BAILLY, Christophe a Geneviève COMTE-BELLOT. *Turbulence*. Cham: Springer International Publishing, 2015. Experimental Fluid Mechanics. ISBN 978-3-319-16159-4.
- [16] SCHNIEDENHARN, Maximilian, Frederik WIEDEMANN a Johannes Henrich SCHLEIFENBAUM. Visualization of the shielding gas flow in SLM machines by space-resolved thermal anemometry. *Rapid Prototyping Journal*. 2018, roč. 24, č. 8, s. 1296–1304. ISSN 13552546.
- [17] MERZKIRCH, Wolfgang. *Flow vizualization*. 2. vyd. B.m.: Elsevier, 2012, 1987. ISBN 9780080506586.
- [18] STRYKOWSKI, P J a D J FORLITI. Flow Control Applications using Countercurrent Shear. *Recent Advances in Experimental Fluid Mechanics*. 2000, č. 1966.
- [19] CANONSBURG, Technology Drive. ANSYS FLUENT User ' s Guide. *Knowledge Creation Diffusion Utilization*. 2012, roč. 15317, č. October, s. 724–746.
- [20] VLČEK, Petr. Modelování turbulentního proudění. 2013, s. 21.
- [21] BLEJCHAŘ, Tomáš. *TURBULENCE MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ -CFX učební text*. 2012. ISBN 9788024826066.
- [22] GUIDE, Ansys Fluent Theory. Ansys Fluent Theory Guide. *ANSYS Inc., USA*. 2013, roč. 15317, č. November, s. 724–746.
- [23] PHILO, Adam M, Nicholas P LAVERY, S G R BROWN, John A CHERRY, Adam PHILO<sup>1</sup>, N P LAVERY<sup>1</sup>, S G R BROWN<sup>1</sup>, J CHERRY<sup>1</sup>, J SIENZ<sup>1</sup>, J JOANNOU a C J SUTCLIFFE. Comparison and Validation of Gas Flow Models in a Powder Bed Selective Laser Melting Process PhD Project Effect of Waves on the Performance of Yachts View project Industry-Academic Knowledge Transfer View project Comparison and Validation of Gas Flow Mode. 2015, č. December.
- [24] CHEN, Yu, Guglielmo VASTOLA a Yong Wei ZHANG. Optimization of Inert Gas Flow Inside Laser Powder Bed Fusion Chamber. 2018, s. 1931–1939.
- [25] PHILO, A M, C J SUTCLIFFE, J SIENZ, N P LAVERY, Bay CAMPUS, Crymlyn BURROWS, Brownlow HILL, Additive MANUFACTURING, Products DIVISION a Whitebridge PARK. A Study Into the Effects of Gas Flow Inlet Design of the Renishaw Am250 Laser Powder Bed Fusion Machine Using Computational Modelling. *Solid Freeform Fabrication Symposium*. 2017, s. 1203–1219.
- [26] WANG, Wei Cheng a Chia Yao CHANG. Flow analysis of the laminated manufacturing system with laser sintering of metal powder. Part I: flow uniformity inside the working chamber. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017, roč. 92, č. 1–4, s. 1299–1314. ISSN 14333015.
- [27] GUOQING, Zhang, Li JUNXIN, Li JIN, Zhou XIAOYU a Wang ANMIN. 3D metal printer dust filter structural optimal design and key performance research. *Materials & Design*. 2019, roč. 183, s. 108114. ISSN 0264-1275.
- [28] WANG, Junye. Theory of flow distribution in manifolds. *Chemical Engineering Journal*. 2011, roč. 168, č. 3, s. 1331–1345. ISSN 13858947.

- [29] DABIRI, Soroush, Mohammadreza HASHEMI, Mohammadfazel RAHIMI, Mehdi BAHIRAEI a Erfan KHODABANDEH. Design of an innovative distributor to improve flow uniformity using cylindrical obstacles in header of a fuel cell. *Energy*. 2018, roč. 152, s. 719–731. ISSN 03605442.
- [30] LIU, Hong, Peiwen LI a Kai WANG. The flow downstream of a bifurcation of a flow channel for uniform flow distribution via cascade flow channel bifurcations. *Applied Thermal Engineering*. 2015, roč. 81, s. 114–127. ISSN 13594311.
- [31] BEJAN, A. Design with Constructal Law. 2006, roč. 22, č. 1, s. 140–147.
- [32] FAN, Zhiwei, Xinggui ZHOU, Lingai LUO a Weikang YUAN. Experimental investigation of the flow distribution of a 2-dimensional constructal distributor. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2008, roč. 33, č. 1, s. 77–83. ISSN 08941777.
- [33] WEI, Min, Yilin FAN, Lingai LUO a Gilles FLAMANT. CFD-based evolutionary algorithm for the realization of target fluid flow distribution among parallel channels. *Chemical Engineering Research and Design*. 2015. ISSN 02638762.
- [34] NOTES, Editorial. Lighter and stronger: SLM allows for full topology optimization. 2016.
- [35] HALAJ, Martin a Eva KUREKOVÁ. Meranie prietoku, pretečeného množstva. *atp journal*. 2011, č. 7.
- [36] BŘEZINA, Josef. *Návrh aditivně vyráběného tepelného výměníku olej-voda pro formuli student*. B.m., 2019. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování.



## 9 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN

### 9.1 Použité skratky

SLM	Selective laser melting
CFD	Computational Fluid Dynamics
PIV	Particle image velocimetry (laserová anemometria)
LDA	Laser Doppler anemometer (laserová Dopplerová anemometria)
HWA	Hot wire anemometry (termálna anemometria)
DNS	Direct Numerical Simulation (priame numerické simulácie)
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
LES	Large Eddy Simulation
FDM	Fused Deposition Modeling

### 9.2 Použité fyzikálne veličiny

$E$	objemová hustota energie
$P$	výkon laseru
$v_s$	rýchlosť skenovania
$h_d$	šrafovací vzdialenosť
$t_l$	výška vrstvy
$m$	hmotnosť
$V$	objem súčiastky
$\rho$	hustota
$\mu$	dynamická viskozita
$\nu$	kinematická viskozita
$U_d$	stredná hodnota rýchlosti v danom priereze
$D$	hydraulický priemer
$T_\omega$	teplota drôtu

$R_{\omega}$	elektrického odporu drôtu
$R_0$	odpor drôtu
$T_0$	referenčná teplota
$\alpha_0$	koeficient rezistivity materiálu drôtu
$m_{\omega}$	hmotnosť drôtu
$c_{\omega}$	merná tepelná kapacita
$I_{\omega}$	prúd privádzaný do vodiča
$F(u_n)$	rýchlosť obtekania vodiča
$T_u$	intenzita turbulencií
$V'$	turbulentná zložka rýchlosti
$\bar{V}$	relatívna stredná rýchlosť prúdenia
$I$	intenzita turbulencií

## 10 ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV

Obr. 1-1 Stavebná komora a vizualizácia prúdenia v jej objeme [3].	15
Obr. 2-1 Procesné parametre SLM [6].	16
Obr. 2-2 Stavebná komora SLM.	17
Obr. 2-3 Schéma cirkulačného okruhu inertnej atmosféry tlačiarne SLM 280HL.	18
Obr. 2-4 Stavebná komora bez bočníc a popis komponentov vplyvujúcich na prúdenie a návrh úprav.	18
Obr. 2-5 Usmernené prúdenie v stavebnej komore EOS Eosint M280 [8].	19
Obr. 2-6 Schematické znázornenie vzniku možných vedľajších produktov [2].	20
Obr. 2-7 Mechanizmy formovania rozdielnych druhov rozptýlených častíc [9].	21
Obr. 2-8 Oblasť v ktorej bola vyhodnocovaná hmotnosť akumulovaných častíc (naznačená červenou) [10].	22
Obr. 2-9 Graf závislosti rýchlosti prúdenia, skenovacej stratégie a vyprsknutej hmotnosti prášku akumulovaného v blízkosti výstupu [10].	22
Obr. 2-10 Konfokálna mikroskopia: a) povrchu vyrobeného zo štandardnými parametrami, b) povrchu vyrobeného zo zníženou rýchlosťou prúdenia, kde je jasne viditeľná tvorba sférických útvarov [2].	23
Obr. 2-11 Miesta kde bol pozorovaný proces rozstrekovania častíc [2].	24
Obr. 2-12 Závislosť pevnosti v ťahu na testovaných parametroch [11].	25
Obr. 2-13 Výsledná úprava vstupu inertnej atmosféry do stavebnej komory (vpravo v reze) [4].	26
Obr. 2-14 Výsledky porozity pre jednotlivé konfigurácie vo výške 10 mm nad stavebným povrchom [4].	27
Obr. 2-15 Vstupy inertnej atmosféry v stavebnej komore. (a) pôvodný vstup, (b) upravený vstup z výrazným zúžením vstupného otvoru [12].	28
Obr. 2-16 Porozita vzoriek (a) porozita pred úpravami; (b) porozita po úpravách [12].	28
Obr. 2-17 Vizualizácia rýchlostí prúdenia v stavebnej komore SLM [16].	31
Obr. 2-18 Vizualizácia turbulentnej zložky rýchlosti prúdenia [16].	32
Obr. 2-19 Vizualizácia prúdenia pomocou metódy niťových sond (tuft grid) [18].	32
Obr. 2-20 Meracia aparátúra použitá pri experimentálnom overení prúdenia [23].	35

Obr. 2-21 Modely prúdenia v programe Ansys Fluent v porovnaní s experimentálnym meraním metódou termickej anemometrie [23].	36
Obr. 2-22 Zobrazenie kontúr rýchlosti pre originálnu geometriu: a) v rovine prechádzajúcou stredom vstupnej trysky, b) v rovine 3 mm nad stavebnou rovinou [24].	37
Obr. 2-23 Zobrazenie kontúr rýchlosti v bočnom pohľade na stavebnú komoru [24].	38
Obr. 2-24 Kontúry rýchlosti v oblasti 3 mm nad stavebnou rovinou po úprave výšky vstupných otvorov [24].	38
Obr. 2-25 Kontúry rýchlosti vo výške 3 mm nad stavebnou rovinou po úprave výšky vstupných otvorov a ich predĺžení na ľavej strane je vykreslená časť stavebnej roviny, kde prebieha stavba a na pravej strane je celá stavebná komora [24].	39
Obr. 2-26 Kontúry rýchlosti 3 mm nad stavebnou rovinou po úprave výšky vstupných otvorov ich predĺžení a zvýšení počtu vstupných otvorov z 13 na 15. Na ľavej strane je vykreslená len oblasť stavebnej platformy a na pravej je celá stavebná komora [24].	39
Obr. 2-27 Bočný pohľad na kontúry rýchlosti naprieč stavebnou komorou vľavo bez sekundárneho prúdenia vpravo prejav efektu sekundárneho prívodu atmosféry z vrchnej časti [24].	40
Obr. 2-28 Experimentálne meranie pomocou termickej anemometrie oproti výsledkom z CFD simulácií, vo vrchnej časti sú experimentálne namerané kontúry rýchlosti, v spodnej časti sú výsledky CFD simulácií, na ľavej strane je zobrazená spodná rovina nachádzajúca sa 3 mm nad stavebným povrchom, na pravej strane je vertikálna rovina prechádzajúca stredom vstupu [25].	41
Obr. 2-29 Geometria vstupných otvorov [25].	41
Obr. 2-30 Porovnanie efektu vstupných parametrov na výstupné parametre [25].	42
Obr. 2-31 Geometria stavebnej komory [26].	43
Obr. 2-32 Simulácia prúdenia v pôvodnom výstupe: a) rýchlosť prúdenia, b) statický tlak, c) rozloženie turbulencií [27].	44
Obr. 2-33 Simulácia prúdenia v upravenom výstupe: a) rýchlosť prúdenia; b) statický tlak; c) rozloženie turbulencií [27].	44
Obr. 2-34 Rozdielne typy paralelných viackanálikových distribútorov prúdenia: a) Konzekutívny, b) Bifurkačný, c) Priečkový, d) Deflektorový [29].	45
Obr. 2-35 Bifurkačný distribútor prúdenia: a) 2D, b) 3D [30].	46
Obr. 2-36 Deflektorový distribútor prúdenia [33].	46
Obr. 4-1 Postup riešenia práce.	50
Obr. 4-2 Priebeh merania rýchlosti prúdenia, tesniaci element (červený).	52

Obr. 4-3 Stavebná komora v reze, znázornenie vertikálnej a horizontálnej roviny v ktorých prebiehali merania.....	52
Obr. 4-4 Súčiastky, ktoré boli reverzne namodelované zo skenov: a) vstup inertnej atmosféry, b) výstup, c) krytka vstupu (v reze).....	53
Obr. 4-5 Výpočtová sieť s 13 845 136 elementami: a) celá výpočtová sieť, b) detail výpočtovej siete vstupu.....	53
Obr. 4-6 Charakteristika pumpy – závislosť pretlaku na prietoku pumpy [7].....	54
Obr. 4-7 Nastavenie okrajových podmienok.....	55
Obr. 4-8 Kontúry rýchlostí z CFD simulácií v horizontálnej rovine v pôvodnej konfigurácii stavebnej komory.....	56
Obr. 4-9 Kontúry rýchlostí z CFD simulácií vo vertikálnej rovine v pôvodnej konfigurácii stavebnej komory.....	56
Obr. 4-10 Výpočtová sieť s využitím symetrie. ....	57
Obr. 4-11 Rozloženie priemernej rýchlosti prúdenia na segmentoch distribútora.....	57
Obr. 4-12 Kontúry rýchlosti vo vertikálnej rovine (pohľad spredu na stavebnú komoru), porovnanie experimentálneho merania a CFD simulácií. ....	58
Obr. 4-13 Kontúry rýchlosti v horizontálnej rovine 42 mm vysoko (pohľad zhora na stavebnú komoru), porovnanie experimentálneho merania a CFD simulácií (stavebná platforma naznačená rámčekom). ....	58
Obr. 4-14 Kontúry rýchlosti vo vertikálnej rovine (pohľad spredu na stavebnú komoru), porovnanie experimentálneho merania a CFD simulácií. ....	59
Obr. 4-15 Kontúry rýchlosti v horizontálnej rovine 12 mm nad stavebnou platformou (pohľad zhora na stavebnú komoru), porovnanie experimentálneho merania a CFD simulácií (stavebná platforma naznačená rámčekom). ....	60
Obr. 4-16 Rýchlostný profil: porovnanie experimentálneho merania s CFD simuláciami na začiatku stavebnej platformy (vpravo sa nachádza vstup a vľavo výstup). ....	61
Obr. 4-17 Stavebná platforma s naznačenými vzorkami pri ktorých je uvedená hodnota porozity jednotlivých vzoriek v (%) (v kockách je uvedené ich číslovanie na neskorší popis). ....	62
Obr. 4-18 Kontúry rýchlosti získané z experimentálneho merania v pohľade zhora s naznačenou stavebnou platformou spolu s naznačenými vzorkami kociek (hodnoty vedľa kociek predstavujú ich porozitu v (%)).....	63
Obr. 4-19 Spôsoby distribúcie inertnej atmosféry v stavebnej komore: a) vrchný vstup s usmerneným prúdením, b) vrchný vstup s neusmerneným prúdením. ....	64

Obr. 4-20 Vrchný vstup inertnej atmosféry, prívod plynu do vstupu je realizovaný pomocou trubky zdola ďalej je trajektória častíc znázornená modrou čiarou; a) pôvodný vstup inertnej atmosféry; b) prvý koncepčný návrh úpravy, kde bude upravený vrchný vstup inertnej atmosféry s rozdelením na dva segmenty. ....	65
Obr. 4-21 Stavebná komora spolu so vstupmi a výstupmi: a) pôvodná konfigurácia komory s jedným výstupom; b) druhá koncepčná variant s prídavným výstupom. ....	65
Obr. 4-22 Variant bifurkačného distribútor prúdenia. ....	66
Obr. 4-23 Variant spodného distribútora prúdenia s využitím rozdelenia už v prívodnej trubke. ....	66
Obr. 4-24 Variant modifikácia pôvodného riešenia. ....	67
Obr. 4-25 Variant s lamelami.....	67
Obr. 4-26 Koncepčné riešenia odvodu: a) Prvý koncept, kde dochádza k distribúcii prúdenia vo výstupnej trubke, b) Druhý koncept, kde dochádza k rozdeľovaniu prúdenia pred výstupnou trubkou (modré šípky znázorňujú vstup do výstupu a červené odt'ah).....	68
Obr. 4-27 Návrh č. 1, ktorý tvoria lamely rozdeľujúce prúdenie v horizontálnom a vertikálnom smere. ....	69
Obr. 4-28 Výsledky simulácie návrhu č.1, zobrazujú vektory rýchlosti vo vstupnej časti kde je možné pozorovať ich nerovnomerné rozloženie. ....	70
Obr. 4-29 Návrh č. 2., ktorý tvoria lamely rozdeľujúce prúdenie vo vertikálnom smere ..	71
Obr. 4-30 Vykreslenie vektorov na vstupe výstupu, kde je už viditeľné rovnomerné rozloženie vektorov rýchlosti po šírke distribútora. ....	71
Obr. 5-1 Využitelná dĺžka distribútora pri návrhu. ....	74
Obr. 5-2 Výpočtová sieť použitá pre simulácie. ....	75
Obr. 5-3 Nastavenie okrajových podmienok.....	75
Obr. 5-4 Lokálne navyšovanie rýchlostí pri použití primárnych lamiel na distribúciu. ....	76
Obr. 5-5 Distribútor a naznačenie primárnych lamiel (červená) a sekundárnych lamiel (modrá).....	77
Obr. 5-6 Rozloženie priemernej rýchlosti prúdenia na primárnych segmentoch distribútora. ....	77
Obr. 5-7 Rozloženie priemernej rýchlosti prúdenia na sekundárnych segmentoch distribútora. ....	78
Obr. 5-8 Výsledky CFD simulácií finálnej verzie.....	78
Obr. 5-9 Výpočtová sieť. ....	79

Obr. 5-10 Rozloženie priemernej rýchlosti prúdenia na primárnych segmentoch distribútora. ....	79
Obr. 5-11 Rozloženie priemernej rýchlosti prúdenia na sekundárnych segmentoch distribútora. ....	79
Obr. 5-12 Distribútor v reze s vloženým tesnením. ....	80
Obr. 5-13 Upevnenie distribútora v stavebnej komore (demontovateľná stena priehľadná). ....	80
Obr. 5-14 Výsledný model distribútora. ....	80
Obr. 5-15 Deflektor (biely) aj spolu s distribútorom v reze. ....	81
Obr. 5-16 Schéma určenia uhlu natočenia deflektoru. ....	81
Obr. 5-17 a) nastavenie okrajových podmienok; b) použitá výpočtová sieť. ....	81
Obr. 5-18 Výsledky simulácie, kde je možné pozorovať, že majoritná časť prúdnic smeruje na ochranné sklo. ....	82
Obr. 5-19 Upevnenie prídavného výstupu s prídavným potrubím (červené). ....	83
Obr. 5-20 Demontovateľná lamela (červená), naznačené vymedzovacie zarážky. ....	83
Obr. 5-21 Výpočtová sieť prídavného odvodu. ....	84
Obr. 5-22 Nastavenie okrajových podmienok. ....	84
Obr. 5-23 Kontúry rýchlosti v centrálnej časti prídavného výstupu. ....	85
Obr. 5-24 Detail spodného distribútora prúdenia. ....	85
Obr. 5-25 Navrhnuté komponenty z ABS a PLA nainštalované v komore. ....	86
Obr. 5-26 Porovnanie výsledkov experimentálneho merania vo vertikálnej rovine (vyrezané časti predstavujú oblasti kde nebolo možné uskutočniť meranie pretože sa v danej oblasti nachádza prídavný výstup). ....	87
Obr. 5-27 Porovnanie výsledkov experimentálneho merania v horizontálnej rovine. ....	88
Obr. 5-28 Porovnanie kontúr rýchlostí experimentálneho merania v horizontálnej rovine s naznačenou stavebnou platformou. ....	88
Obr. 5-29 Rýchlostný profil na prídavnom výstupe. ....	89
Obr. 5-30 Porovnanie porozít (porozita je uvedená vedľa kocky v (%)), (číslovanie kociek vo vnútri). ....	89
Obr. 5-31 Porovnanie korelácie porozity a rýchlosti prúdenia pôvodnej konfigurácie a výslednej konfigurácie. ....	90
Obr. 5-32 Výpočtová sieť. ....	90

Obr. 5-33 Kontúry rýchlostí. ....	91
Obr. 5-34 Priemerné rýchlosti na jednotlivých segmentoch prídavného výstupu.....	91
Obr. 5-35 Postavené diely s podporami na stavebnej platforme. ....	92
Obr. 5-36 Porovnanie nameraných rýchlostí pri úpravách vyrobených na FDM tlačiarni (vľavo), a vyrobených na SLM tlačiarni (vpravo). ....	93
Obr. 5-37 Porovnanie nameraných rýchlostí pri úpravách vyrobených na FDM tlačiarni (vľavo), a vyrobených na SLM tlačiarni (vpravo). ....	94
Obr. 5-38 Miesta kde prebiehalo meranie rýchlostného profilu.....	94
Obr. 5-39 Rýchlostný profil prídavného výstupu. ....	94
Obr. 5-40 Závislosť otáčok pumpy na rýchlosti prúdenia v stavebnej komore (červené hodnoty tvoria priemer). ....	95
Obr. 5-41 Rýchlostné pole s výkonnejšou pumpu pri 40 % výkonu.....	96
Obr. 5-42 Porovnanie odvádzania kondenzátu: a) pred úpravami 75 % výkon pôvodnej pumpy, b) po úpravách 75 % výkon pôvodnej pumpy, c) po úpravách výkonnejšia pumpa 40 % výkonu. ....	97
Obr. 6-1 Porovnanie CFD simulácií a experimentálnych meraní.....	99
Obr. 6-2 CFD simulácia výsledného riešenia. ....	100
Obr. 6-3 Rýchlostný profil na prídavnom výstupe. ....	100
Obr. 12-1 Detail spodného distribútoru prúdenia na stavebnej platforme. ....	116
Obr. 12-2 Defekt ku ktorému došlo počas stavby (diel vpravo). ....	116
Obr. 12-3 Opracovaný spodný distribútor po odstránení podporných štruktúr a opieskovaní. ....	117
Obr. 12-4 Prídavný výstup s demontovateľnou lamelou.....	117
Obr. 12-5 Deflektor prúdenia.....	117
Obr. 12-6 Nainštalované navrhnuté úpravy v stavebnej komore. ....	118



## 11 ZOZNAM TABULEK

Tab. 2-1 Technická špecifikácia nainštalovanej pumpy [7]. .....	19
Tab. 2-2 Prípady, ktoré boli skúmané [10]. .....	21
Tab. 2-3 Pearsonova korelácia medzi rýchlosťou prúdenia a porozitou v rôznej výške nad stavebnou rovinou [4]. .....	27
Tab. 2-4 Podmienky nastavené pre simulácie [25]. .....	40
Tab. 4-1 Technické parametre použitej sondy. ....	51
Tab. 4-2 Tlaky v cirkulačnom okruhu pri 75 % výkone pumpy [3]. .....	54
Tab. 4-3 Okrajové podmienky použité pre simuláciu. ....	55
Tab. 4-4 Okrajové podmienky použité pre simuláciu. ....	57
Tab. 4-5 Okrajové podmienky použité pre simuláciu návrhu č. 1.....	69
Tab. 5-1 Okrajové podmienky použité pre simulácie.....	76
Tab. 5-2 Okrajové podmienky použité pre simulácie.....	82
Tab. 5-3 Okrajové podmienky použité pre simulácie prídavného výstupu. ....	84
Tab. 5-4 Okrajové podmienky použité pre simulácie prídavného výstupu. ....	91
Tab. 5-5 Podtlak medzi filtrom a pumpou v závislosti na výkone pumpy. ....	95
Tab. 12-1 Procesné parametre použité pre stavbu vzoriek.....	115
Tab. 12-2 Technické parametre výkonnejšej pumpy.....	115

## 12 ZOZNAM PRÍLOH

**Príloha A:** Procesné parametre

**Príloha B:** Technické údaje výkonnejšej pumpy

**Príloha C:** Fotografická dokumentácia

Externé prílohy:

**Príloha D:** Digitálne dáta

## 12.1 Príloha A

Tab. 12-1 Procesné parametre použité pre stavbu vzoriek

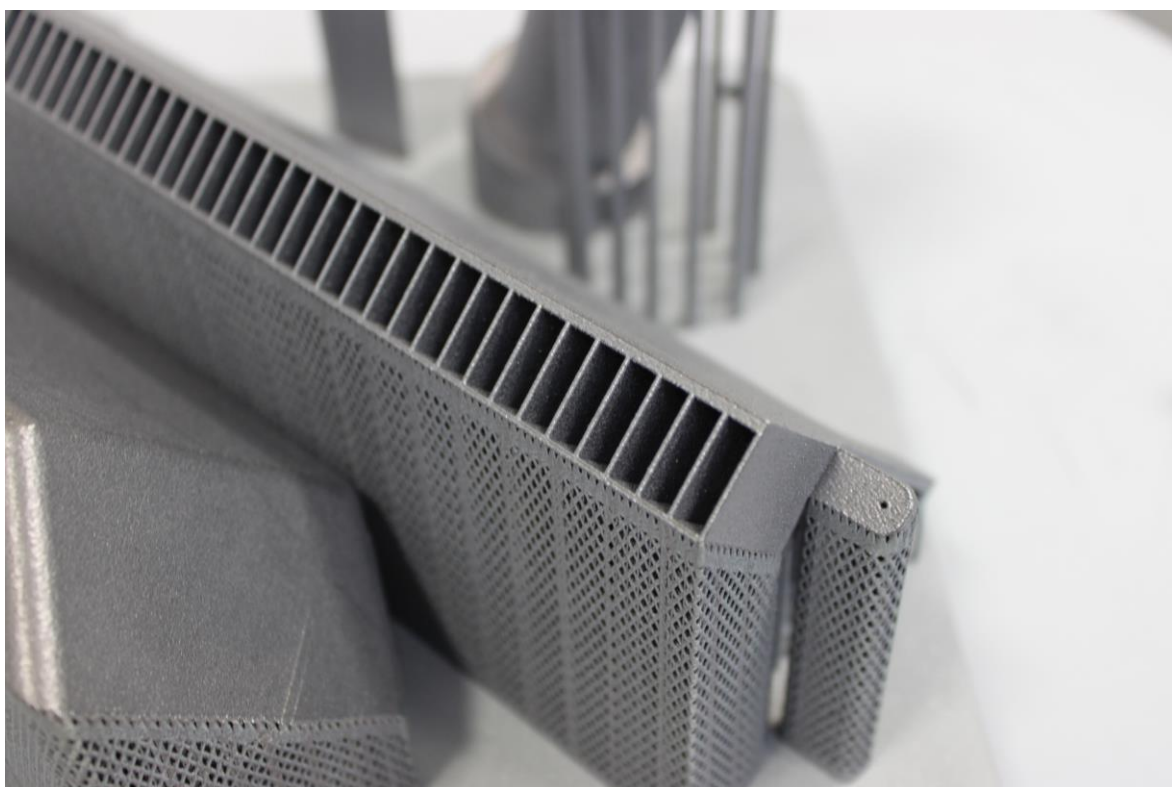
<b>Procesné parametre použité pre stavbu</b>	
Výkon laseru	350 W
Rýchlosť skenovania - okraje	500 mm·s <sup>-1</sup>
Rýchlosť skenovania - objem	930 mm·s <sup>-1</sup>
Kompenzácia lúča	150 μm
Výška vrstvy	50 μm
Šrafovací vzdialenosť	150 μm
Predohrev platformy	150 °C
Zaostrenie laseru	Ø 82 μm
Obsah kyslíka	Pod 0,2 %
Atmosféra	N <sub>2</sub>

## 12.2 Príloha B

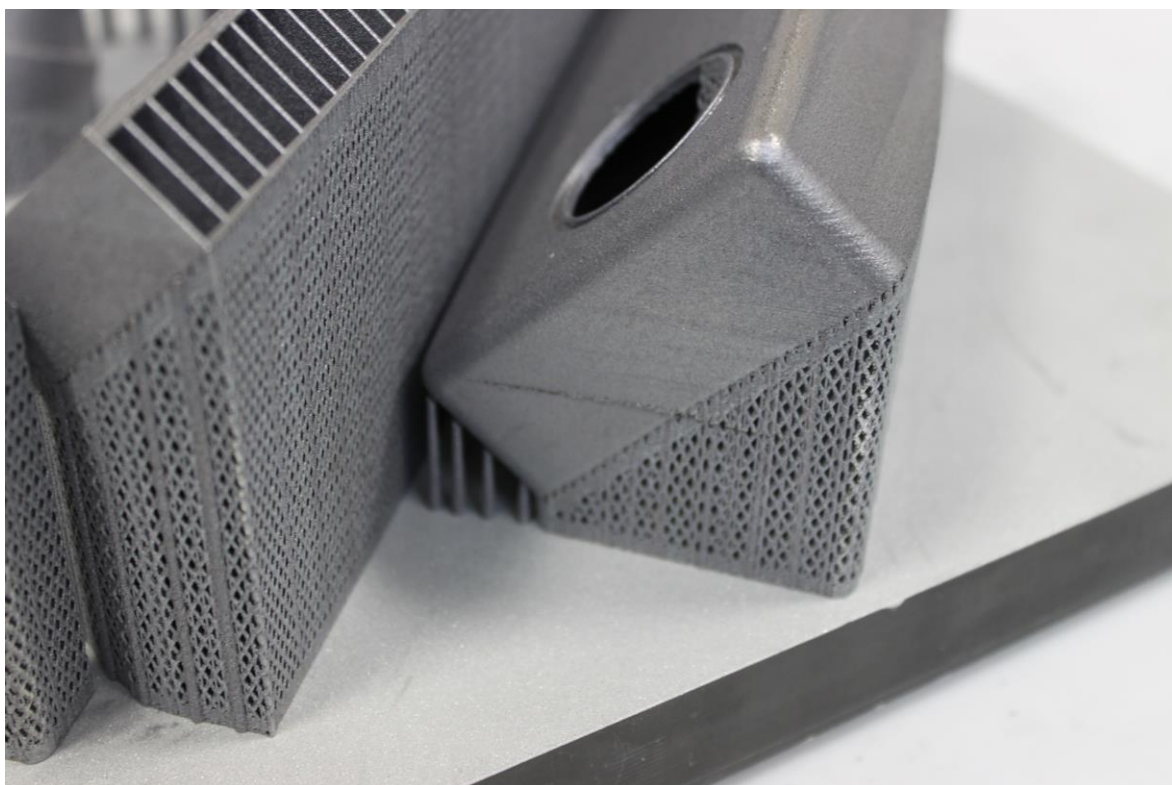
Tab. 12-2 Technické parametre výkonnejšej pumpy.

<b>Technické parametre pumpy SV300/2</b>	
Prietok	280 m <sup>3</sup> /h
Otáčky	6000 min <sup>-1</sup>
Príkon	9,6 kW

## 12.3 Príloha C



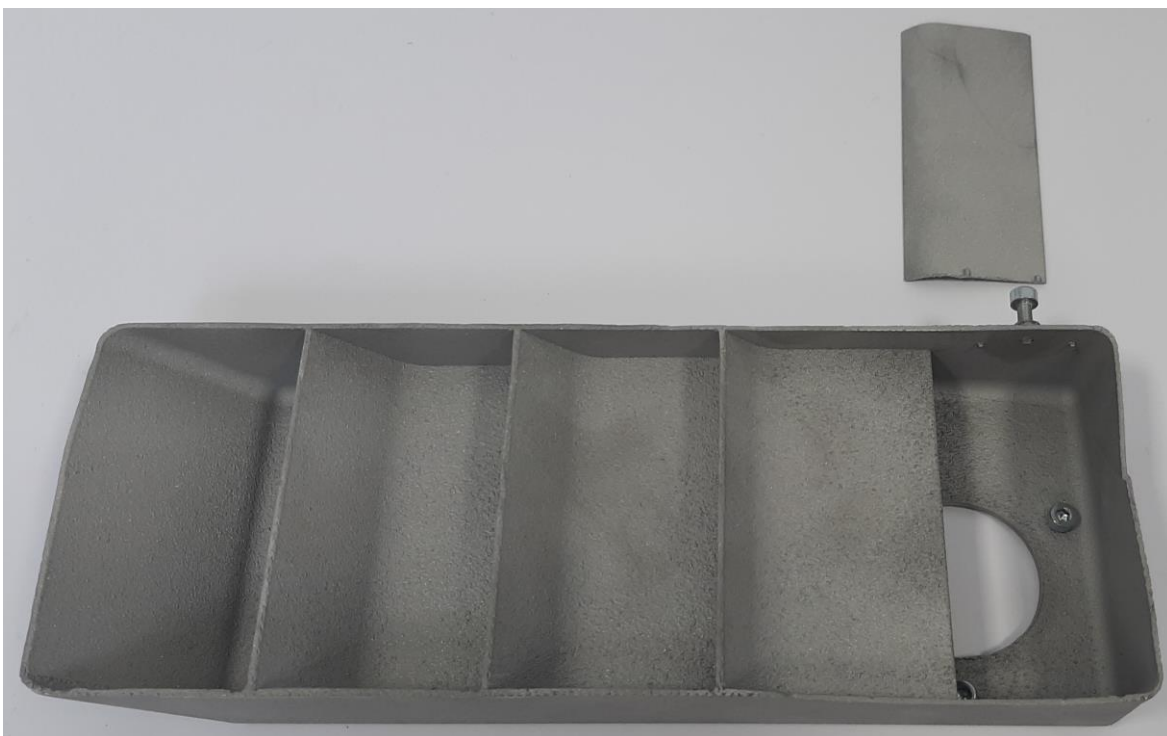
Obr. 12-1 Detail spodného distribútoru prúdenia na stavebnej platforme.



Obr. 12-2 Defekt ku ktorému došlo počas stavby (diel vpravo).



Obr. 12-3 Opracovaný spodný distribútor po odstránení podporných štruktúr a opieskovaní.



Obr. 12-4 Prídavný výstup s demontovateľnou lamelou.



Obr. 12-5 Deflektor prúdenia.



Obr. 12-6 Nainštalované navrhnuté úpravy v stavebnej komore.