

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství  
Studijní zaměření: Stavba energetických strojů a zařízení

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Ověření chování ostrohranného otvoru umístěného v potrubí  
při stlačitelném proudění plynu

Autor: **Eva BERKOVÁ**  
Vedoucí práce: **Prof. Ing. Václav URUBA, CSc.**  
Odborný konzultant: **Ing. Jiří NĚMEČEK**

Akademický rok 2016/2017

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Eva BERKOVÁ**

Osobní číslo: **S14B0085P**

Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Stavba energetických strojů a zařízení**

Název tématu: **Ověření chování ostrohranného otvoru umístěného v potrubí při stlačitelném proudění plynu**

Zadávací katedra: **Katedra energetických strojů a zařízení**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem práce je provedení studie stlačitelného proudění plynu při proudění ostrohranným otvorem uvnitř potrubí. Budou použita jednak empirická data z dostupné literatury, dále vlastní simulace pomocí CFD metod. Výsledky budou sloužit ke zdokonalení metod měření a vyhodnocení průtoku stlačitelného plynu potrubím.

Máte za úkol provést:

1. Vypracování teoretického rozboru dané problematiky.
2. Přípravu modelu pro výpočty v CFD a provedení verifikace sítě.
3. Vyhodnocení (pomocí výpočtů CFD) průtočné charakteristiky ostrohranných otvorů s různými poměry délky k průměru otvoru a pro různé poměry průměrů otvoru clony a potrubí před otvorem.
4. Na vybraném příkladu porovnání součinitele místní ztráty otvoru určeného pomocí empirických výpočtů s výsledky CFD.

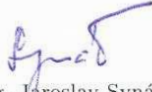
Rozsah grafických prací: -  
Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

- **Idel'čik I. J.: Handbook of Hydraulic Resistance, 4th ed., rev. and augmented, Redding: Begell House, 2007**
- **Dejč M. E.: Technická dynamika plynů, Praha, SNTL, 1967**
- **Ježek J., Váradiová B., Adamec J.: Mechanika tekutin, vyd. 3. přeprac. Praha, České vysoké učení technické, 1997, ISBN 80-01-01615-3**

Vedoucí bakalářské práce: **Prof. Ing. Václav Uruba, CSc.**  
Katedra energetických strojů a zařízení  
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jiří Němeček**  
Doosan Škoda Power  
Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2016**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2017**

  
Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.  
děkan



  
Dr. Ing. Jaroslav Synáč  
vedoucí katedry

V Plzni dne 3. října 2016

## Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: 30.5.2017 .....

.....  
Barbora'  
.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Chci poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, panu Prof. Ing. Urubovi, CSc., a též i konzultantovi mé bakalářské práce, panu Ing. Němečkovi, za cenné rady a připomínky, které mi byly poskytnuty během zpracování této bakalářské práce.

# ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Berková	Jméno Eva	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2301R016 „Stavba energetických strojů a zařízení“		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Prof. Ing. Uruba, CSc.	Jméno Václav	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST - KKE		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	Nehodící se škrtněte
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Ověření chování ostrohranného otvoru umístěného v potrubí při stlačitelném proudění plynu		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKE	<b>ROK ODEVZD.</b>	2017
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	60	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	38	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	22
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<b>STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Bakalářská práce obsahuje stanovení průtokových součinitelů pro různé ostrohranné otvory při stlačitelném proudění plynu metodou CFD, kde daný ostrohranný otvor je zasazen do potrubí. Zejména byl zkoumán vliv hodnoty poměru délky kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu k průměru ostrohranného otvoru a vliv hodnoty poměru průměru ostrohranného otvoru k průměru potrubí. Práce slouží jako podklad pro zhotovení experimentálního měření za účelem ověření průtočných charakteristik ostrohranných otvorů.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	dýza, ostrohranný otvor, hmotnostní průtok, průtokový součinitel, CFD

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Berková	Name Eva	
<b>FIELD OF STUDY</b>	2301R016 „Design of Power Machines and Equipment“		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Prof. Ing. Uruba, CSc.	Name Václav	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKE		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Verification of sharp-edged orifices' behaviour, placed in the pipeline at compressible gas flow		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Power System Engineering	<b>SUBMITTED IN</b>	2017
----------------	------------------------	-------------------	--------------------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	60	<b>TEXT PART</b>	38	<b>GRAPHICAL PART</b>	22
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	Bachelor's thesis contains determination of flow coefficients for different sharp-edged orifices at compressible gas flow using the CFD modelling, where the given sharp-edged orifice is placed in the pipeline. Especially it was researched the influence of the ratio between the length of the channel with the sharp-edged orifice at the input and the diameter of the sharp-edged orifice, and the influence of the ratio between the diameter of sharp-edged orifice and the diameter of the pipeline. The bachelor thesis serves as the basis for experimental measuring aimed at verification of flow characteristics of sharp-edged orifices.
<b>KEY WORDS</b>	nozzle, sharp-edged orifices, mass flow rate, flow coefficient, CFD

## Obsah

Symbolika.....	9
1 Úvod.....	13
2 Teoretická část.....	14
2.1 Termodynamika proudícího ideálního plynu .....	14
2.1.1 Základní teorie.....	14
2.1.1.1 Výtoková rychlost.....	14
2.1.1.2 Rychlost zvuku v ideálním plynu .....	15
2.1.1.3 Kritická rychlost.....	15
2.1.1.4 Kritický tlakový poměr .....	15
2.1.1.5 Závislost rychlosti proudícího média na průřezu kanálu .....	16
2.1.2 Hmotnostní průtok.....	16
2.1.2.1 Hmotnostní průtok Lavalovou dýzou .....	16
2.1.2.2 Hmotnostní průtok zužující se dýzou .....	17
2.1.2.3 Hmotnostní průtok ostrohranným otvorem.....	17
2.1.3 Porovnání hmotnostního průtoku v zužující se dýze a v ostrohranném otvoru .....	20
2.2 Výpočtová studie .....	21
2.2.1 Výpočet hmotnostního průtoku dýzou .....	21
2.2.2 Místní tlakové ztráty.....	21
2.2.2.1 Součinitel místní tlakové ztráty pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu .....	22
2.2.2.2 Vliv velké vstupní rychlosti proudu na hodnotu součinitele místní tlakové ztráty .....	23
2.2.2.3 Výpočet součinitele místní tlakové ztráty vybraného ostrohranného otvoru dle empirického výpočtu.....	23
3 Metoda CFD.....	26
3.1 Model pro výpočty metodou CFD a verifikace sítě .....	26
3.1.1 Geometrie .....	26
3.1.2 Výpočetní síť a její verifikace .....	27
3.1.3 Nastavení řešiče a okrajových podmínek (ANSYS FLUENT).....	30
3.2 Analýza a vyhodnocení průtočných charakteristik ostrohranných otvorů .....	31
3.2.1 Průtočné charakteristiky pro průměr ostrohranného otvoru 50 mm .....	31
3.2.2 Průtočné charakteristiky pro průměr ostrohranného otvoru 80 mm .....	50
3.2.3 Celkové vyhodnocení průtočných charakteristik .....	69



3.3 Stanovení součinitele místní tlakové ztráty vybraného ostrohranného otvoru metodou CFD a jeho porovnání s hodnotou pomocí empirického výpočtu.....	69
4 Závěr.....	72
Seznam použité literatury .....	73
Seznam obrázků .....	74
Seznam tabulek .....	77
Seznam příloh.....	79

## Symbolika

Název veličiny	Značka veličiny	Jednotka veličiny
měrné teplo	$q$	$\left[\frac{\text{J}}{\text{kg}}\right]$
měrná technická práce	$a_t$	$\left[\frac{\text{W}}{\text{kg}}\right]$
rychlost proudícího plynu	$w$	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$
gravitační zrychlení	$g$	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right]$
svislá kartézská souřadnice	$y$	[m]
měrná entalpie	$h$	$\left[\frac{\text{J}}{\text{kg}}\right]$
adiabatický exponent (pro vzduch $\kappa = 1,4$ )	$\kappa$	[-]
specifická plynová konstanta (pro vzduch $r = 287,04 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$ )	$r$	$\left[\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]$
termodynamická teplota	$T$	[K]
tlak	$p$	[Pa]
rychlost zvuku	$a$	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$

hmotnostní průtok	$\dot{m}$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$
hustota	$\rho$	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$
měrný objem	$v$	$\left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\right]$
plocha průřezu	$S$	$[\text{m}^2]$
průtokový součinitel otvoru	$\mu$	$[-]$
tlakový poměr	$\varepsilon$	$[-]$
kritický tlakový poměr	$\varepsilon_*$	$[-]$
druhý kritický tlakový poměr	$\varepsilon_{**}$	$[-]$
poměr průměrů	$\beta$	$[-]$
průměr ostrohranného otvoru	$d$	$[\text{m}]$
průměr potrubí před a za ostrohranným otvorem	$D$	$[\text{m}]$
výtokový součinitel	$K$	$[-]$

bezrozměrný parametr	$\theta, \chi, z, \varphi$	[-]
součinitel místní ztráty	$\zeta$	[-]
koeficient tření	$\lambda$	[-]
koeficient zahrnující vliv délky kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu	$\tau$	[-]
délka kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu	$l$	[m]
drsnost	$k$	[m]
Reynoldsovo číslo	Re	[-]
Machovo číslo	Ma	[-]
součinitel místní ztráty pro velké rychlosti	$\zeta_{Ma}$	[-]
korekce na rychlost proudění před ostrohranným otvorem	$k_{Ma}$	[-]
délka potrubí před kanálem s ostrohranným otvorem na vstupu	$x$	[m]
délka potrubí za kanálem s ostrohranným otvorem na vstupu	$L$	[m]

dynamická vazkost	$\eta$	$\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right]$
měrná tepelná kapacita	$c_p$	$\left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$
trvalá tlaková ztráta	$\Delta p$	[Pa]

### Indexy

- 0 parametry v místě nejmenšího průřezu
- 1 vstupní parametry
- 2 výstupní parametry
- k kritické parametry
- o ostrohranný otvor
- d zužující se dýza

## 1 Úvod

Zařazením ostrohranného otvoru do potrubí dochází k zúžení průtoku, kde v místě zúžení vzroste rychlost proudícího plynu. Důležitým důsledkem je, že pokud proudí plyn potrubím, kde je umístěn ostrohranný otvor, nachází se za ním nižší tlak oproti tlaku před daným otvorem, přičemž teplota se může zachovat. Jedná se o trvalou tlakovou ztrátu neboli přeměnu tlakové energie na jinou formu energie. Popsaný jev se v technické praxi často vyskytuje.

Odborné výklady týkající se proudění ideálního plynu dýzou jsou velmi rozsáhlé a do značné míry i probádané. Co se však týče proudění pracovního média ostrohrannými otvory, je tomu jinak. Z tohoto důvodu se chování ostrohranných otvorů při proudění plynu stalo původním námětem pro psaní mé bakalářské práce. Názorným příkladem je návodka z roku 1943 patřící do firemní dokumentace společnosti DOOSAN ŠKODA POWER, kterou ještě nebyla možnost aktualizovat na základě experimentálně dokázaných znalostí. Uvedená návodka obsahuje průběh hmotnostního průtoku normální clonou v závislosti na měnícím se tlakovém poměru, kde je pracovním médiem přehřátá pára.

Práce si klade za cíl stanovit hmotnostní průtok při proudění vzduchu ostrohranným otvorem v závislosti na měnícím se tlakovém poměru, z čehož lze následně stanovit průtokový součinitel ostrohranného otvoru. Součinitel dává do souvislosti hmotnostní průtok dýzou a ostrohranným otvorem. Největším rozdílem mezi dýzou a ostrohranným otvorem v rámci proudění pracovního média je charakter změny průřezu. U dýzy nastává plynulá změna průřezu a u ostrohranného otvoru náhlá změna průřezu, což má za následek rozdílné chování proudění. Požadavkem pro praktické využití je znalost hodnoty průtokového součinitele ostrohranného otvoru pro různé poměry rozměrů ostrohranných otvorů v závislosti na rozdílných tlakových poměrech. Konkrétním záměrem bakalářské práce je dojít k výsledkům chování ostrohranného otvoru, který je umístěn v potrubí. Ostrohranný otvor umístěný v potrubí má určitou souvislost s případem, kdy se jedná o výtok ostrohranným otvorem, k němuž lze dohledat více informací.

Ostrohranným otvorem lze chápat otvor neboli díru jednoduchého geometrického tvaru v pevné ploše, kde je nátoková hrana ostrá nebo pravoúhlá. Otvory bývají nejčastěji tvaru kruhového, dále pak čtvercového a obdélníkového. Pro ověření chování ostrohranných otvorů je vhodné použít otvor kruhového průřezu, protože je v běžné aplikaci nejpoužívanější, což je dáno jeho snadnou výrobou. Ostrohranný otvor lze velice jednoduše zhotovit, a to i bez použití speciálních nástrojů a procesů. Mezi běžně dostupné nástroje pro výrobu ostrohranných otvorů kruhového tvaru patří především vrták.

Autor bakalářské práce chce zprvu čtenáře seznámit se základní teorií týkající se proudění ideálního plynu dýzou, kde se vyskytuje řada důležitých základních pojmů, které jsou nezbytné pro pochopení celé problematiky. Další část práce je zaměřena na hmotnostní průtok, stěžejní veličinu charakterizující proudění. Uvádí dostupné informace týkající se stanovení hmotnostního průtoku dýzou a hlavně ostrohranným otvorem. Vyhotovení teoretické části slouží jako podklad pro metodu Computational Fluid Dynamics (CFD), pomocí které se stanoví hmotnostní průtok ostrohranným otvorem v proudu vzduchu, čemuž je věnována druhá část bakalářské práce.

## 2 Teoretická část

### 2.1 Termodynamika proudícího ideálního plynu

Proudění plynu se dá charakterizovat jako fyzikální jev, při němž převažuje pohyb jednotlivých částic média v jednom směru. Proudění není téměř nikdy ustálené. Znamená to, že se mění s časem. Lze ho však považovat za ustálené, pokud se v průběhu kratšího časového intervalu mění jen nepatrně.

Ideální plyn je stlačitelný a nevazký. Atmosférický vzduch lze přirovnat k ideálnímu plynu, pro který se uvažují zejména následující zjednodušující předpoklady:

- zůstává v plynném skupenství v celém rozsahu teplot a tlaků,
- je uvažován bez vnitřního tření,
- jeho změny stavu přesně popisuje Charlesův, Gay-Lussacův a Boyle-Mariottův zákon. [1][2]

Pomocí Charlesova, Gay-Lussacova a Boyle-Mariottova zákona jsou popsány základní vratné změny stavu pro ideální plyn. V rámci základní vratné změny stavu, kdy konkrétní ideální plyn přejde ze stavu jedna do stavu dva, se musí zachovat hmotnost. Charlesův zákon se pak konkrétně týká děje izochorického, kde se navíc zachovává objem a mění se pouze tlak a teplota. Gay-Lussacův zákon popisuje děj izobarický, kde je konstantní veličinou tlak a mění se objem s teplotou. Boyle-Mariottův zákon popisuje děj izotermický, kde je konstantní veličinou teplota a mění se objem s tlakem. [2]

Důvodem idealizace je komplikovanost sestavení dokonce i přibližného řešení reálného proudění plynů, které je prostorové a mění se s časem.

#### 2.1.1 Základní teorie

Kapitola pojednává o základních veličinách, které je nutné uvést pro pochopení následujících vztahů a závislostí týkajících se proudění.

Zdroj základní teorie: [2][3]

##### 2.1.1.1 Výtoková rychlost

První zákon termodynamiky pro kontrolní objem je vyjádřen vztahem

$$dq = dh + da_t + wdw + gdy. \quad 2-1$$

Předpoklady pro proudění ideálního plynu:

- nedochází k výměně tepla s okolím  $dq = 0$ ,
- proudění je ve vodorovném směru  $dy = 0$ ,
- plyn nekoná technickou práci  $da_t = 0$ .

Předchozí rovnici lze tedy zjednodušit na tvar  $0 = dh + wdw$ .

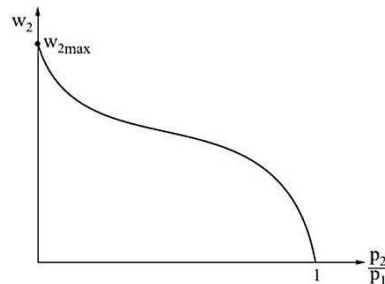
Provedením integrace ze stavu ve vstupním průřezu kanálu do stavu ve výstupním průřezu kanálu vyjde rovnice pro snadné vyjádření výtokové rychlosti

$$\frac{w_2^2 - w_1^2}{2} = h_1 - h_2. \quad 2-2$$

Z toho plyne, že pokud dojde k výtoku ideálního plynu z nádoby, kdy je přítoková rychlost nulová, platí  $w_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2)}$ .

Pomocí vztahu  $dh = c_p dt$ , Mayerova vztahu, Poissonovy rovnice a dalších úprav se dojde k následujícímu závěru – Saint Venant Wantzelova rovnice

$$w_2 = \sqrt{2 \frac{\kappa \cdot r}{\kappa - 1} T_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]}. \quad 2-3$$



Obr. 2.1: Závislost výtokové rychlosti ideálního plynu na tlakovém poměru [3]

### 2.1.1.2 Rychlost zvuku v ideálním plynu

Vztah pro rychlost zvuku v ideálním plynu vychází z rovnice adiabaty.

$$a = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}} = \sqrt{\kappa \cdot r \cdot T} \quad 2-4$$

### 2.1.1.3 Kritická rychlost

Kritická rychlost je definována jako průtoková rychlost, která je rovna rychlosti zvuku v daném průřezu.

$$w_2 = a_2$$

$$w_2 = w_k$$

$$w_k = \sqrt{2 \left( \frac{\kappa}{\kappa + 1} \right) r \cdot T_1} \quad 2-5$$

### 2.1.1.4 Kritický tlakový poměr

Kritický tlakový poměr je definován jako poměr tlaků, při kterém platí  $w_2 = w_k$ .

Z výše uvedeného tvrzení a postupných úprav plyne, že kritický tlakový poměr závisí pouze na adiabatickém exponentu.

$$\left( \frac{p_2}{p_1} \right)_k = \frac{p_k}{p_1} = \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad 2-6$$

Vzduch lze přirovnat s ohledem na velký obsah dusíku a kyslíku k dvouatomovému plynu, pro který je adiabatický exponent roven číslu 1,4.

$$\left( \frac{p_2}{p_1} \right)_k = \frac{p_k}{p_1} = \left( \frac{2}{1,4 + 1} \right)^{\frac{1,4}{1,4-1}} = 0,528$$



### 2.1.1.5 Závislost rychlosti proudícího média na průřezu kanálu

Při ustáleném proudění je v každém průřezu proudové trubice stejný hmotnostní průtok, což udává rovnice kontinuity

$$\dot{m} = \rho \cdot w \cdot S. \quad 2-7$$

Z výše zmíněné rovnice kontinuity a z prvního zákona termodynamiky pro kontrolní objem lze vyjádřit Hugoniotův teorém s použitím Machova čísla.

$$Ma = \frac{w}{a} \quad 2-8$$

$$\frac{dw}{w}(1 - Ma^2) + \frac{dS}{S} = 0 \quad 2-9$$

Předpoklady a důsledky:

- jedná se o dýzu – rychlost proudu roste  $dw > 0$ ,
- $w < a$ ,  $Ma < 1$ ,  $(1 - Ma^2) > 0 \Rightarrow dS < 0$  – k urychlení podzvukového proudu je zapotřebí zužující se dýzy ve směru proudu (rychlost proudu ale nemůže překročit rychlost zvuku),
- $w > a$ ,  $Ma > 1$ ,  $(1 - Ma^2) < 0 \Rightarrow dS > 0$  – k urychlení nadzvukového proudu je zapotřebí rozšiřující se dýzy ve směru proudu,
- $w = a$ ,  $Ma = 1$ ,  $(1 - Ma^2) = 0 \Rightarrow dS = 0$  – průřez dýzy nabývá extrému, což znamená, že se vzhledem k předchozím závěrům jedná o minimum. Z toho plyne, že v minimálním průřezu nadzvukové/Lavalovy dýzy rychlost proudu musí dosahovat rychlosti kritické.

### 2.1.2 Hmotnostní průtok

Bakalářská práce se zaměřuje na zkoumání vlivu přidáním ostrohranného otvoru do potrubí výhradně s ohledem na jednu důležitou charakteristickou veličinu proudění, kterou je hmotnostní průtok. Objemový průtok zde nemá takový význam, jelikož je zde řešeno stlačitelné proudění. Hmotnostní průtok vyjadřuje hmotnost látky, která projde průřezem potrubí za jednotku času. Udává se v tunách za hodinu nebo v kilogramech za sekundu.

Při stlačitelném proudění musí být splněny základní fyzikální zákony - zákon zachování hmotnosti, zákon zachování hybnosti, zákon zachování energie a musí platit rovnice stavu. Zákon zachování hmotnosti je úzce spjatý s rovnicí kontinuity, která je základem pro určení hmotnostního průtoku při proudění tekutin za působení vnějších sil. Rovnice kontinuity stanovuje, že vždy platí již výše uvedené tvrzení - při ustáleném proudění je v každém průřezu proudové trubice stejný hmotnostní průtok. [4]

#### 2.1.2.1 Hmotnostní průtok Lavalovou dýzou

Zdroj: [3]

Rovnice kontinuity pro minimální průřez dýzy má následující tvar

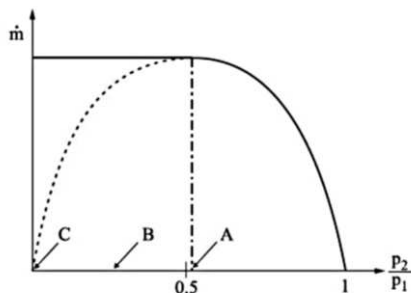
$$\dot{m} = \rho_k \cdot w_k \cdot S_{\min}. \quad 2-10$$

Kritická hustota je dána vztahem

$$\rho_k = \frac{p_1}{r \cdot T_1} \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{1}{\kappa - 1}}. \quad 2-11$$

Kritická rychlost pro daný plyn závisí pouze na teplotě před dýzou a kritická hustota na teplotě a tlaku před dýzou, tudíž hmotnostní průtok závisí také pouze na teplotě a tlaku před dýzou. Minimální průřez Lavalovy dýzy je dán. Nutnou podmínkou je však dostatečně nízký tlak za dýzou, aby v minimálním průřezu vznikla rychlost kritická – Lavalova dýza.

Lavalova dýza je využívána výhradně pro tlakový poměr, který je menší než kritický. Pro případ vzduchu jako ideálního plynu je nutné se pohybovat s tlakovým poměrem v intervalu od 0 až do hodnoty 0,528.



Obr. 2.2: Závislost hmotnostního průtoku ideálního plynu na tlakovém poměru pro konstantní minimální průřez dýzy, ve kterém je kritická rychlost [3]

Popis obrázku:

A - zužující se dýza, ze které vytéká plyn kritickou rychlostí,

B - Lavalova dýza (plyn dosahuje v minimálním průřezu kritické rychlosti), ze které vytéká plyn nadzvukovou rychlostí,

C - Lavalova dýza (plyn dosahuje v minimálním průřezu kritické rychlosti), ze které vytéká plyn maximální nadzvukovou rychlostí.

Čárkovaně značená křivka vykresluje případ Lavalovy dýzy za předpokladu konstantního výstupního průřezu. To znamená, že minimální průřez se směrem k počátku grafu zmenšuje.

### 2.1.2.2 Hmotnostní průtok zužující se dýzou

Z Obr. 2.2 a předešlé teorie vyplývá, že pokud je dán tlakový poměr, který je roven kritickému nebo je větší než kritický a zároveň je menší než 1, jedná se o zužující se dýzu s podzvukovým prouděním. Pro vzduch, který má tlakový poměr větší než 0,528 a menší než 1, je tudíž výtoková rychlost vždy menší než rychlost zvuku v daném výstupním průřezu.

Hmotnostní průtok se vypočte následujícím způsobem  $\dot{m} = \rho_2 \cdot w_2 \cdot S_2$ . Ze stavové rovnice za uvažování adiabatického jevu plyne vyjádření hustoty v daném výstupním průřezu

$$\rho_2 = \frac{p_1}{r \cdot T_1} \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{\kappa}}. \quad 2-12$$

### 2.1.2.3 Hmotnostní průtok ostrohranným otvorem

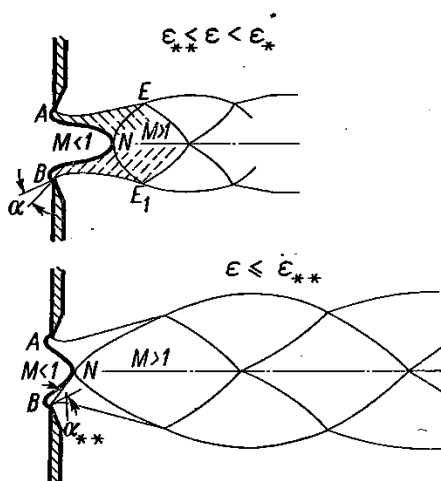
Zdroj: [5]

Výzkumem ostrohranných otvorů v rámci proudění plynů se zabývalo již nemálo osobností. Názorným příkladem jsou klasická díla S. A. Čaplygina, který se zabýval výtokem plynu ostrohranným otvorem.

V předešlé teorii proudění byl pokládán důraz na hodnotu kritického tlakového poměru, který rozdělával dýzy na Lavalovy a zužující se. V teorii proudění plynu ostrohrannými otvory je též nutné rozlišovat, zda se jedná o oblast s tlakovým poměrem nadkritickým či podkritickým.

Důležité poznatky ohledně tvaru proudu a průtoku plynu otvorem stanovil ve své práci „O proudech plynu“ S. A. Čaplygin. Zabýval se výhradně tlakovým poměrem podkritickým a tlakovým poměrem blížícím se hodnotám kritickým za předpokladu rovinného proudu. Pokud je tlakový poměr podkritický, nastává v oblasti výtoku z ostrohranného otvoru zužování proudícího plynu, které má spojitý charakter. V případě, že se dosáhne kritického tlakového poměru, dosáhne proudící plyn kritické rychlosti na obvodu, avšak uvnitř proudu je rychlost menší. Tyto rozdílné rychlosti proudu plynu se vyrovnávají vlivem zužování proudu a urychlování jeho vnitřní části v určité vzdálenosti za otvorem.

Pro oblast s nadkritickým tlakovým poměrem rozvinul Čaplyginovu teorii proudění plynu F. I. Frankl. Pro proudové pole je zde typický vznik „jazyka“, což je čára zvukových rychlostí, která dělí proudění na nadzvukové (napravo) a podzvukové (nalevo - uvnitř „jazyka“). Tvar deformace čáry zvukových rychlostí odpovídá tomu, že nadzvukové rychlosti proudu nejdříve vznikají po obvodu. Proud plynu se při výtoku rozšiřuje. Při snižování tlakového poměru dochází k deformaci „jazyka“, ovšem jen do určité hodnoty tlakového poměru, kterou ve své teorii F.I. Frankl definoval. Danou hodnotu nazval druhým kritickým tlakovým poměrem, jehož definice je uvedena níže.



Obr. 2.3: Výtok proudu ostrohranným otvorem při různých tlakových poměrech [5]

### Průtokový součinitel ostrohranného otvoru

Změny proudového pole v závislosti na tlakovém poměru lze dát do souvislosti s hmotnostním průtokem plynu v ostrohranném otvoru. Za tímto účelem je zapotřebí si definovat průtokový součinitel ostrohranného otvoru.

Při stejném tlakovém poměru je průtokový součinitel ostrohranného otvoru  $\mu$  definován jako poměr skutečného hmotnostního průtoku v ostrohranném otvoru  $\dot{m}_o$  k hmotnostnímu průtoku plynu v zužující se dýze  $\dot{m}_d$ , přičemž plocha výstupního průřezu je stejná jako plocha zkoumaného otvoru.

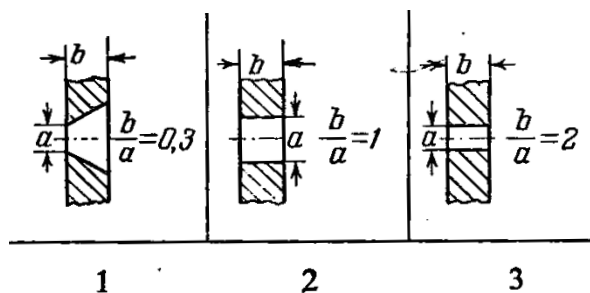
$$\mu = \frac{\dot{m}_o}{\dot{m}_d} \quad 2-13$$

Na základě této uvedené definice součinitele stanovil S. A. Čaplygin hodnoty průtokového součinitele pro vzduch pro vybrané tlakové poměry.

Tab. 2.1: Hodnoty průtokového součinitele ostrohranného otvoru pro vzduch [5]

Tlakový poměr $\frac{p_2}{p_1}$ [–]	Průtokový součinitel $\mu$ [–]
0,676	0,68
0,641	0,70
0,606	0,71
0,559	0,73
0,529	0,74

Tabulka dává přehled o průtokovém součiniteli, který má rostoucí charakter v závislosti na klesajícím tlakového poměru. Daná skutečnost je ukázána pro tlakové poměry od 0,676 až do hodnoty blížíící se kritickému tlakovému poměru. Hodnoty průtokového součinitele jsou stanoveny na základě experimentálního měření, které bylo provedeno na tvaru ostrohranného otvoru, jenž je uveden na Obr. 2.4 pod číslem 1.



Obr. 2.4: Tvary ostrohranných otvorů [5]

### Druhý kritický tlakový poměr

Druhý kritický tlak definoval F.I. Frankl následovně: „Existuje taková velikost vnějšího tlaku  $p_{**}$ , při níž přechodová čára nabude stabilní polohy; další snižování tlaku vnějšího prostředí nezpůsobí již její deformaci.“. Druhý kritický tlakový poměr je pak tedy dán poměrem druhého kritického tlaku k tlaku vstupnímu a značí se  $\varepsilon_{**}$ .

Následující tabulka uvádí konkrétní hodnoty druhého kritického tlakového poměru pro různé tvary ostrohranných otvorů, kde je proudícím médiem vzduch. Tvary konkrétních otvorů lze spatřit na Obr. 2.4. Ke každé hodnotě druhého kritického tlakového poměru  $\varepsilon_{**}$  je vždy uvedena i příslušná hodnota průtokového součinitele  $\mu$ . Jedná se vždy o maximální hodnotu průtokového součinitele pro konkrétní tvar ostrohranného otvoru.

Tab. 2.2: Hodnoty druhého kritického tlakového poměru a průtokového součinitele pro různé tvary ostrohranných otvorů pro vzduch [5]

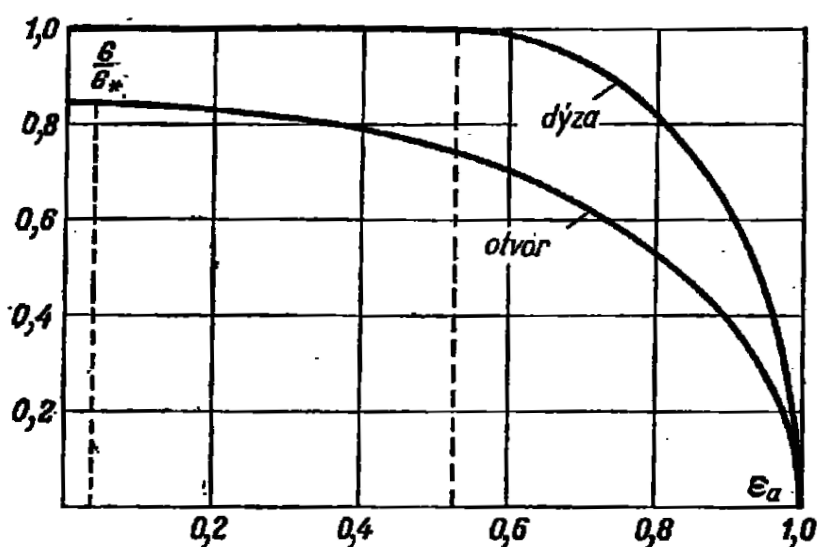
Tvar otvoru	1	2	3
Druhý kritický tlakový poměr $\varepsilon_{**}$ [–]	0,037	0,18	-
Průtokový součinitel $\mu$ [–]	0,85	0,88	0,9

Za povšimnutí stojí chybějící hodnota druhého kritického tlakového poměru pro tvar otvoru, který je charakteristický dvojnásobně převažující délkou kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu nad průměrem ostrohranného otvoru.

### 2.1.3 Porovnání hmotnostního průtoku v zužující se dýze a v ostrohranném otvoru

V návodce patřící DOOSAN ŠKODA POWER je dán graf průběhu hmotnostního průtoku normální clonou pro přehřátou páru - adiabatický exponent 1,31, jehož výchozí hodnoty jsou vypočteny z DIN 1952 z roku 1943, str. 23. V grafu jsou znázorněny tři závislosti, které popisují průběh hmotnostního průtoku dýzou  $\beta$ , průtokový součinitel otvoru  $\mu$  a výsledný průběh hmotnostního průtoku ostrohranným otvorem  $\mu \cdot \beta$  v závislosti na tlakovém poměru. Jedná se o vykreslení poměrného hmotnostního průtoku, kde je hmotnostní průtok vždy vztažen k hodnotě hmotnostního průtoku při kritickém tlakovém poměru pro daný případ. Graf je uveden v příloze č. 1- Průtok normální clonou [6].

V literatuře od M. E. Dejče je uveden graf hmotnostního průtoku dýzou a otvorem v závislosti na tlakovém poměru při stejných výstupních průřezích. Graf vznikl na základě experimentálního měření prováděného se vzduchem, který má adiabatický exponent 1,4. Při prvním měření proudil vzduch zužující se dýzou a při druhém ostrohranným otvorem. Dýza a otvor měly stejný výstupní průřez a v průběhu měření byl měněn pouze tlakový poměr – tlak před a za ostrohranným otvorem. Závislost patřící hmotnostnímu průtoku vzduchu dýzou odpovídá závislosti na Obr. 2.2, jelikož zde platí, že konstantní minimální průřez Lavalovy dýzy je chápán jako konstantní výstupní průřez zužující se dýzy. Důvodem je úvaha, že i pro nadkritickou oblast postačí použít dýzu zužující se, jelikož zde není zapotřebí zvyšovat výtokovou rychlost plynu. Celá myšlenka spočívá v tom, že v nadkritické oblasti je uvažováno použití pouze první poloviny Lavalovy dýzy – zužující se dýza, která dosahuje ve výstupním průřezu rychlosti kritické. V níže uvedeném grafu se též jedná pouze o poměrné vykreslení hmotnostního průtoku. Graf vypadá následovně:



Obr. 2.5: Porovnání hmotnostního průtoku plynu v zužující se dýze a v ostrohranném otvoru při stejných výstupních průřezích [5]

Pro hodnoty tlakového poměru od 1 až do 0,528 má hmotnostní průtok při proudění vzduchu dýzou i ostrohranným otvorem podobný rostoucí charakter, přičemž u dýzy je růst výraznější.

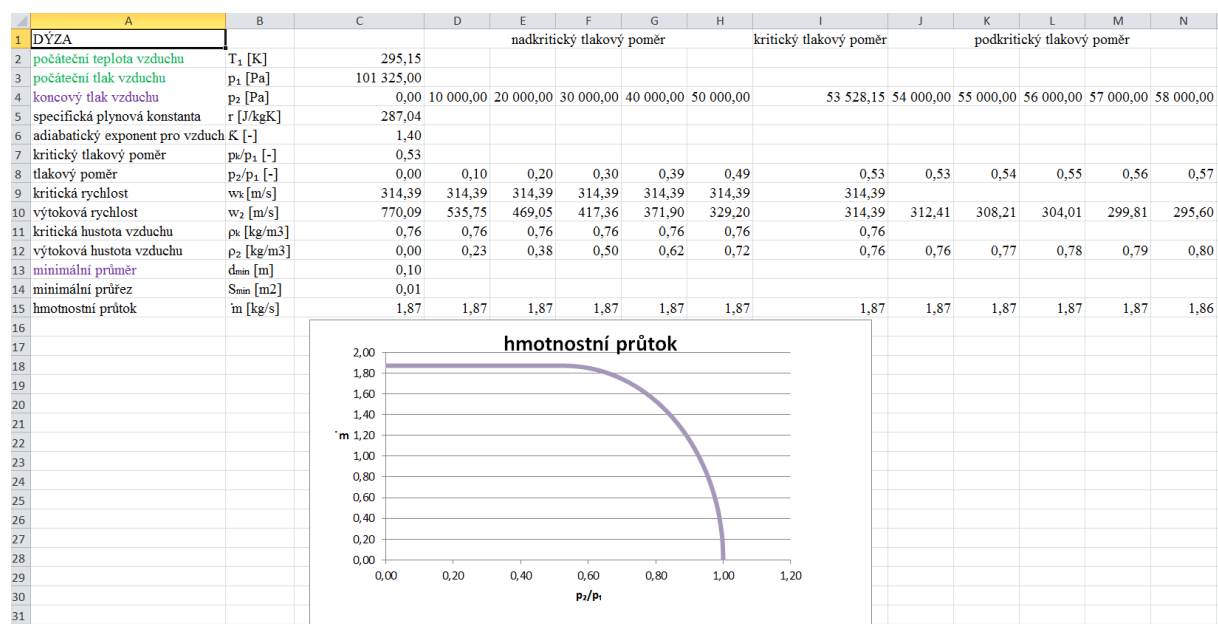
Maximální hmotnostní průtok při proudění vzduchu dýzou nastává v okamžiku kritického tlakového poměru - hodnota 0,528, při dalším snižování tlakového poměru je již hmotnostní průtok konstantní. U ostrohranných otvorů je však hodnota maximálního hmotnostního průtoku odlišná. Pokud je tlakový poměr menší než kritický, hmotnostní průtok vzduchu ostrohranným otvorem roste na základě vlivu změny přechodové čáry. Hmotnostní průtok dosahuje maxima při druhém kritickém tlakovém poměru a při dalším poklesu tlaku zůstává konstantní.

## 2.2 Výpočtová studie

Kapitola se věnuje zejména výpočtovým vztahům, které se týkají hmotnostního průtoku při proudění vzduchu dýzou, aby bylo možné stanovit požadovaný průtokový součinitel. Dále uvádí, jak stanovit součinitele místní ztráty dle empirických výpočtů pro vybraný typ ostrohranného otvoru, aby bylo možné výsledky získané metodou CFD ověřit.

### 2.2.1 Výpočet hmotnostního průtoku dýzou

Cílem bakalářské práce je stanovení průtokového součinitele, které se neobejde bez určení hmotnostního průtoku vzduchu dýzou. K danému výpočtu je nutné použít vzorce uvedené v podkapitole 2.1. Je zde uvažován výtok z nádoby, což znamená zanedbání počáteční rychlosti vzduchu. Hmotnostní průtok závisí na počáteční teplotě vzduchu, na počátečním a koncovém tlaku vzduchu a zejména na minimálním průřezu dýzy. Vzhledem k četnosti proměnných, které navíc předem nelze stanovit všechny, byla vytvořena šablona se vzorci v Microsoft Excelu, která je připravena pro korekci dle použití metody CFD.



Obr. 2.6: Ukázka výpočtu hmotnostního průtoku dýzou v Microsoft Excelu

### 2.2.2 Místní tlakové ztráty

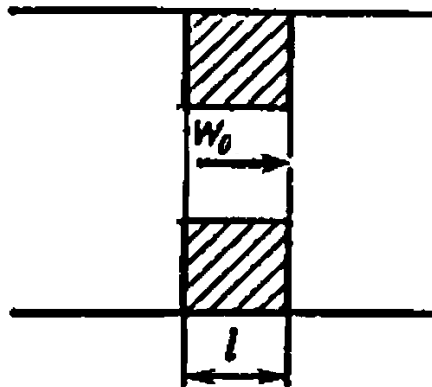
V potrubí je vždy nutné počítat s určitými tlakovými ztrátami, které vznikají v důsledku tření. Jedná se o to, že část tlakové energie se přemění na tepelnou energii. Vedle třecích ztrát existují však ještě přídavné ztráty, kterým se říká místní tlakové ztráty. Příčinou vzniku místních tlakových ztrát je změna velikosti průřezu potrubí. Z výše uvedeného vyplývá, že v případě ostrohranného otvoru umístěného v potrubí se z důvodu měnícího se charakteru proudění uvnitř potrubí určí tlaková ztráta jako součin dynamického tlaku tekutiny a součinitele místní

tlakové ztráty. Součinitel místní tlakové ztráty se určuje ve většině případů experimentálně a je vždy aplikován na místní dynamický tlak. Daný součinitel je funkcí tvaru potrubí, velikosti potrubí a dále rychlosti, což se významně projevuje až při vyšších rychlostech proudění. Hodnotu součinitele místní tlakové ztráty lze stanovit dle empirických vzorců.

### 2.2.2.1 Součinitel místní tlakové ztráty pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu

Zde je nutno zaměnit pojem ostrohranným otvor za kanál s ostrohranným otvorem na vstupu. Důvodem je již nezanedbatelný třetí rozměr ostrohranného otvoru. Kanál s ostrohranným otvorem na vstupu lze charakterizovat poměrem délky kanálu k průměru ostrohranného otvoru na vstupu větším než je hodnota 0,015. Kanál s ostrohranným otvorem na vstupu, který je umístěn v potrubí, se vyznačuje postupnou dvojitou expanzí. Potrubí má stejný průměr před i za daným kanálem. [7]

Pro určení součinitele místní ztráty je čerpáno z literatury od I. E. Idelchika. V daném zdroji jsou uvedeny empirické vzorce pro určení součinitele místní tlakové ztráty pro různé tvary a rozměry kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu. Pro porovnání výsledku s metodou CFD byl vybrán kanál s ostrohranným otvorem na vstupu, který je znázorněn na Obr. 2.7.



Obr. 2.7: Kanál s ostrohranným otvorem na vstupu [7]

Vztah pro výpočet místní tlakové ztráty v potrubí, které obsahuje kanál s ostrohranným otvorem na vstupu, je následující

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho_1 \cdot w_1^2}{2} = \zeta \cdot p_{d1}. \quad 2-14$$

Dále jsou uvedeny vzorce pro stanovení součinitele místní ztráty dle zdroje [7], který je pro výše uvedený výpočet nezbytný.

$$\zeta = \left[ 0,5 \left( 1 - \frac{S_0}{S_1} \right)^{0,75} + \tau \left( 1 - \frac{S_0}{S_1} \right)^{1,375} + \left( 1 - \frac{S_0}{S_1} \right)^2 + \lambda \frac{l}{d} \right] \left( \frac{S_1}{S_0} \right)^2 \quad 2-15$$

$$\tau = \left( 2,4 - \frac{l}{d} \right) \cdot 10^{-\varphi} \quad 2-16$$

$$\varphi = 0,25 + \frac{0,535 \left( \frac{l}{d} \right)^8}{0,05 + \left( \frac{l}{d} \right)^7} \quad 2-17$$

### 2.2.2.2 Vliv velké vstupní rychlosti proudu na hodnotu součinitele místní tlakové ztráty

Proudění lze dle hodnoty kritického Reynoldsova čísla, které popisuje vztah mezi třecí a setrvačnou silou, rozdělit na laminární a turbulentní. Turbulentní proudění lze charakterizovat jako trojrozměrný a časově proměnný pohyb proudící látky. Jsou pro něj typické víry, fluktuace rychlosti, tlaku a značná nahodilost změn. Bakalářská práce se zaměřuje na turbulentní proudění, a to zejména kvůli předpokládaným velkým rychlostem proudění. Z tohoto důvodu je nutné se zaměřit na Machovo číslo.

Machovo číslo je dáno vztahem, který byl již uveden v podkapitole 2.1.1.5 pod označení 2-8

$$Ma = \frac{w}{a}, \text{ kde } a = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}}.$$

Machovo číslo, poměr rychlosti proudící látky k rychlosti zvuku v dané látce, určuje okamžitý místní stav proudu. Na Machově čísle je závislá korekce součinitele místní ztráty, která bere v úvahu stlačitelnost plynu. Součinitel místní ztráty pro velké vstupní rychlosti proudění je pak dán vztahem

$$\zeta_{Ma} = k_{Ma} \cdot \zeta. \quad 2-18$$

Machovo číslo, které stanoví hodnotu korekce, se vypočte dosazením vstupních parametrů – parametrů před kanálem s ostrohranným otvorem na vstupu ( $w_1, a_1$ ).

Tab. 2.3: Hodnota korekce  $k_{Ma}$  pro různé poměry průřezu ostrohranného otvoru k průřezu potrubí v závislosti na Machově čísle [7]

$\frac{S_0}{S_1} [-]$	$Ma_1 [-]$													
	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
0,2	1,00	1,09	1,30											
0,3	1,00	1,03	1,13	1,51										
0,4	1,00	1,00	1,03	1,14	1,41									
0,5	1,00	1,00	1,00	1,03	1,10	1,27	1,85							
0,6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,04	1,12	1,30	1,77						
0,7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,03	1,08	1,16	1,35	1,68					
0,8	1,00	1,00	1,0	1,00	1,01	1,03	1,07	1,12	1,20	1,37	1,63	2,01		
0,9	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,02	1,04	1,07	1,13	1,21	1,33	1,50	1,75

### 2.2.2.3 Výpočet součinitele místní tlakové ztráty vybraného ostrohranného otvoru dle empirického výpočtu

Použité vzorce jsou uvedeny v podkapitole 2.2.2.1.

Dáno:

$$\dot{m} = 0,396 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$D = 0,1 \text{ m}$$

$$d = 0,05 \text{ m}$$



$$l = 0,125 \text{ m}$$

$$k = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$$\kappa = 1,4$$

$$\eta = 1,789 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

$$\rho_1 = 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$p_{c1} = 101325 \text{ Pa}$$

$$p_{s2} = 60000 \text{ Pa}$$

Výpočet:

$$w_1 = \frac{\dot{m}}{\rho_1 \frac{\pi \cdot D^2}{4}} = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\rho_1 \cdot \pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 0,396}{1,225 \cdot \pi \cdot 0,1^2} = 41,159 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\frac{S_0}{S_1} = \frac{\frac{\pi \cdot d^2}{4}}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \frac{4}{\pi \cdot D^2} = \frac{d^2}{D^2} = \frac{0,05^2}{0,1^2} = 0,25$$

$$\frac{l}{d} = \frac{0,125}{0,05} = 2,5$$

$$\frac{d}{D} = \frac{0,05}{0,1} = 0,5$$

$$\varphi = 0,25 + \frac{0,535 \left(\frac{l}{d}\right)^8}{0,05 + \left(\frac{l}{d}\right)^7} = 0,25 + \frac{0,535 \cdot 2,5^8}{0,05 + 2,5^7} = 1,587$$

$$\tau = \left(2,4 - \frac{l}{d}\right) \cdot 10^{-\varphi} = (2,4 - 2,5) \cdot 10^{-1,587} = -0,00259$$

Pro použití rovnice 2-22 je zapotřebí určit koeficient tření  $\lambda$ . Koeficient tření lze pro velká Reynoldsova čísla ( $Re > 4000$ ) stanovit dle vztahu, který stanovil Colebrook-White. Vztah platí pro oblast mezi hydraulicky hladkým potrubím a hydraulicky drsným potrubím. [8]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left( \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,71 \cdot D} \right) \quad 2-19$$

Koeficient tření se nachází na levé a pravé straně, proto je zapotřebí jeho hodnotu určit postupnou aproximací.

$$Re = \frac{w_1 \cdot D}{\nu} = \frac{w_1 \cdot D \cdot \rho_1}{\eta} = \frac{41,159 \cdot 0,1 \cdot 1,225}{1,789 \cdot 10^{-5}} = 281832,169$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left( \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,71 \cdot D} \right)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left( \frac{2,51}{281832,169 \sqrt{\lambda}} + \frac{5 \cdot 10^{-6}}{3,71 \cdot 0,1} \right)$$

Kvalifikovaný odhad:  $\lambda = 0,0144$

$$\lambda = \left[ \frac{1}{-2 \log \left( \frac{2,51}{281832,169 \sqrt{0,0144}} + \frac{5 \cdot 10^{-6}}{3,71 \cdot 0,1} \right)} \right]^2$$

$$\lambda = 0,0152$$

$$\lambda = \left[ \frac{1}{-2 \log \left( \frac{2,51}{281832,169 \sqrt{0,0152}} + \frac{5 \cdot 10^{-6}}{3,71 \cdot 0,1} \right)} \right]^2$$

$$\lambda = 0,0151$$

$$\lambda = \left[ \frac{1}{-2 \log \left( \frac{2,51}{281832,169 \sqrt{0,0151}} + \frac{5 \cdot 10^{-6}}{3,71 \cdot 0,1} \right)} \right]^2$$

Konečný výsledek:  $\lambda = 0,0151$

$$\zeta = \left[ 0,5 \left( 1 - \frac{S_0}{S_1} \right)^{0,75} + \tau \left( 1 - \frac{S_0}{S_1} \right)^{1,375} + \left( 1 - \frac{S_0}{S_1} \right)^2 + \lambda \frac{l}{d} \left( \frac{S_1}{S_0} \right)^2 \right]$$

$$\zeta = [0,5 (1 - 0,25)^{0,75} - 0,00259 (1 - 0,25)^{1,375} + (1 - 0,25)^2 + 0,0151 \cdot 2,5] \cdot 0,25^{-2}$$

$$\zeta = 16,02$$

$$Ma_1 = \frac{w_1}{a_1} = \frac{w_1}{\sqrt{\kappa \cdot r \cdot T_1}} = \frac{w_1}{\sqrt{\frac{\kappa \cdot p_{c1}}{\rho_1}}} = \frac{41,159}{\sqrt{\frac{1,4 \cdot 101325}{1,225}}} = 0,121$$

Dle Tab. 2.3 byla zvolena následující hodnota korekce:  $k_{Ma} = 1,3$ .

$$\zeta_{Ma} = k_{Ma} \cdot \zeta = 1,3 \cdot 16,02 = 20,83$$

### 3 Metoda CFD

Computational fluid dynamics neboli CFD lze přeložit z anglického jazyka jako výpočtová dynamika tekutin. Jedná se o numerické výpočty, které se používají v případě, kdy nelze daný problém řešit analyticky. Metoda CFD využívá ve většině případů pro řešení parciálních diferenciálních rovnic metodu konečných objemů. Dalšími metodami je metoda konečných prvků a metoda konečných diferencí.

Použití metody CFD si klade za cíl provést stanovení hodnot hmotnostního průtoku ostrohranným otvorem v závislosti na měnícím se tlakovém poměru a v závislosti na měnících se rozměrech kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu. Je zapotřebí stanovit, jaký vliv má měnící se poměr délky kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu k průměru kruhového ostrohranného otvoru a měnící se poměr průměru ostrohranného otvoru k průměru potrubí.

Po zjištění hmotnostního průtoku ostrohranným otvorem nastane jeho přenesení do souvislosti s hmotnostním průtokem dýzou. To znamená, že se stanoví průtokový součinitel ostrohranného otvoru. Dále se provede získání součinitele místní tlakové ztráty pro jeden konkrétní případ a následně se provede jeho porovnání se součinitelem místní tlakové ztráty stanoveným dle empirického výpočtu.

#### 3.1 Model pro výpočty metodou CFD a verifikace sítě

Metoda CFD se skládá z několika po sobě následujících klíčových fází. V počáteční fázi je důležité vytvořit potřebnou geometrii, na které se budou dané výpočty provádět. Poté se zvolí vhodná výpočetní síť, která pokrývá celou výpočtovou oblast a provede se její verifikace. Verifikace sítě znamená, že vytvořený model sítě je správný z hlediska našich požadovaných výstupů. Součástí počáteční fáze je i nastavení okrajových podmínek a řešiče, které se provede v programu ANSYS FLUENT R18.0 (Academic). V další fázi je samotný výpočet, po kterém se provede zpracování a vyhodnocení výsledků.

##### 3.1.1 Geometrie

V programu Ansys Design Modeler je provedena tvorba geometrie – namodelování kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu, který je umístěn v potrubí. Úloha je řešena jako osově symetrická. Dané řešení úlohy je zde vhodné zejména z důvodu velkého počtu požadovaných výstupů, kterých se dosáhne při změně geometrických rozměrů a při změně tlaku na výstupu.

Pro navržení výchozího modelu pro výpočty jsou zvoleny hodnoty, které jsou uvedeny v Tab. 3.1. Průměr  $d$  a délka kanálu  $l$  s ostrohranným otvorem na vstupu byly při tvorbě geometrie parametrizovány z důvodu zaznamenání vlivu těchto měnících se parametrů na hodnotu hmotnostního průtoku.

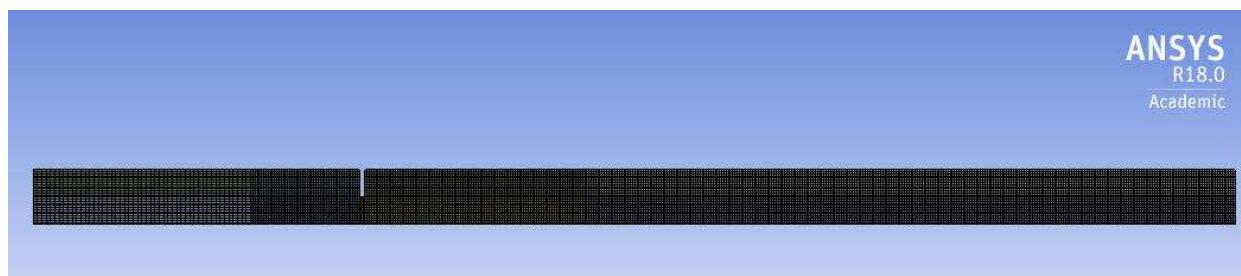
Tab. 3.1: Parametry navržené geometrie

Název veličiny	Značka veličiny	Hodnota veličiny	Jednotka veličiny
průměr potrubí před a za kanálem s ostrohranným otvorem na vstupu	$D$	100	[mm]
průměr ostrohranného otvoru	$d$	50	[mm]
délka kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu	$l$	5	[mm]
délka potrubí před kanálem s ostrohranným otvorem na vstupu	$x$	300	[mm]
délka potrubí za kanálem s ostrohranným otvorem na vstupu	$L$	800	[mm]

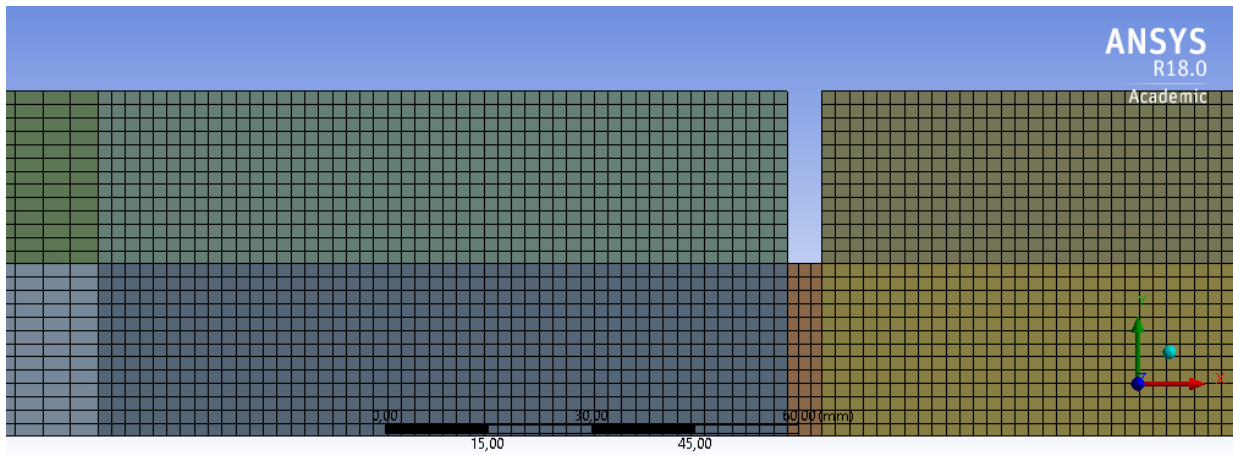
### 3.1.2 Výpočetní síť a její verifikace

Dalším důležitým krokem je vytvoření výpočetní sítě. Pro tvorbu sítě je využito programu Ansys Meshing. V rámci tvorby výpočetní sítě je rozhodující tvar buněk sítě, jejich velikost a též i rozložení buněk sítě. Výpočetní síť může mít značný vliv na konečné výsledky.

Pro zadanou úlohu byla navržena strukturovaná síť tvořená čtyřúhelníky. Buňky výpočetní sítě na vstupní části potrubí mají velikost 2 krát 4 mm. Velikost všech ostatních buněk je 2 krát 2 mm. Celkový počet buněk je 13039. Výpočetní síť je pojmenována SIT1 a lze ji spatřit na Obr. 3.1 a Obr. 3.2.



Obr. 3.1: Výpočetní síť s názvem SIT1



Obr. 3.2: Detail výpočetní sítě s názvem SIT1

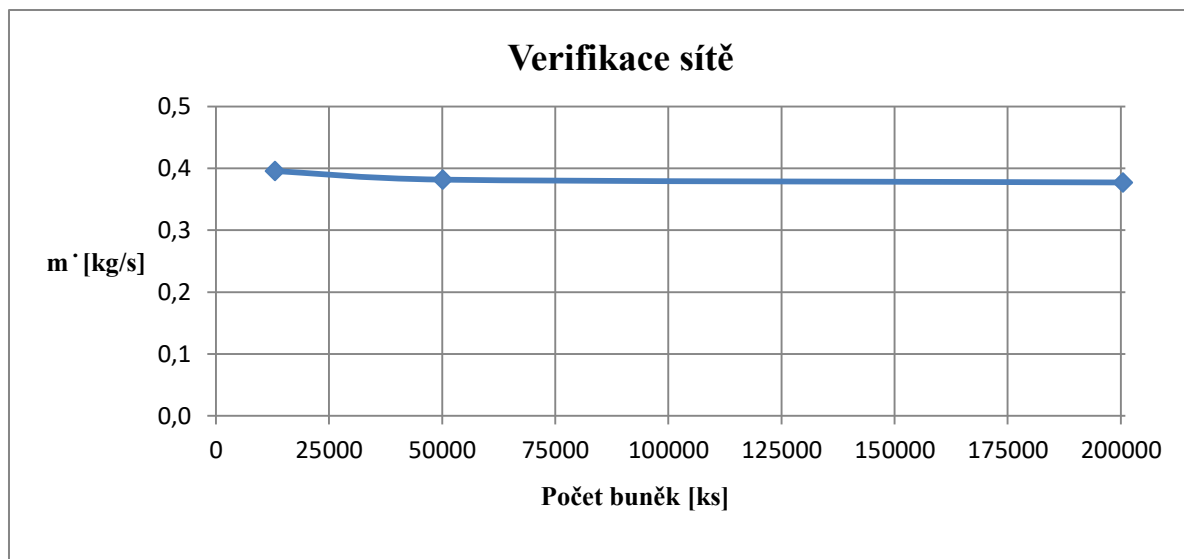
Nyní se provede verifikace výpočetní sítě následujícím způsobem:

- získání hodnoty hmotnostního průtoku při použití výpočetní sítě SIT1,
- zjemnění sítě (rozdělení každé buňky v obou směrech na půl) – vznikne výpočetní sítě SIT2,
- získání hodnoty hmotnostního průtoku při použití výpočetní sítě SIT2,
- porovnání výsledků.

V případě přijatelné shody dvou po sobě jdoucích výsledků se vezme pro výpočty sítě předchozí (hrubší), v tomto případě tedy sítě s názvem SIT1. Sítě se prohlásí za verifikovanou. Pokud ne, celý postup se opakuje až do doby, než přijatelná shoda výsledků nastane.

Tab. 3.2: Zhodnocení hmotnostního průtoku pro různé výpočetní sítě

Název výpočetní sítě	Počet buněk [ks]	Hmotnostní průtok $\dot{m}$ $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$
SIT1	13039	0,39576
SIT2	50125	0,38173
SIT3	200500	0,37717



Obr. 3.3: Diagram závislosti hmotnostního průtoku na počtu buněk výpočetní sítě

Při použití výpočetní sítě SIT1 oproti síti SIT3 vzniká odchylka 4,7 %. Danou odchylku nelze zanedbat. Hodnota hmotnostního průtoku při použití výpočetní sítě SIT2 se příliš neliší od hodnoty získané na základě použití výpočetní sítě SIT3. Konkrétně při použití výpočetní sítě SIT2 oproti síti SIT3 vznikne odchylka 1,2 %, což je vzhledem k požadovaným výstupům dané úlohy přijatelné. Proto lze prohlásit výpočetní síť s názvem SIT2 za verifikovanou. Optimálním řešením z hlediska minimalizování odchylky by bylo použít výpočetní síť, která by obsahovala zhruba 100000 buněk. Daná síť by ale vyžadovala mnohem větší časovou náročnost, což je zde nežádoucí. V následující tabulce jsou uvedeny základní údaje k použité verifikované síti SIT2.

Tab. 3.3: Parametry použité výpočetní sítě s názvem SIT2

Typ sítě	strukturovaná
Tvar buněk	čtyřúhelníky
Počet buněk	50125 ks (z důvodu měnících se rozměrů není pevně dán počet buněk)
Velikost buněk na vstupní části potrubí	1 krát 2 mm
Velikost ostatních buněk	1 krát 1 mm

### 3.1.3 Nastavení řešiče a okrajových podmínek (ANSYS FLUENT)

Při výběru řešiče a nastavování jeho parametrů se dalo na doporučení kvalifikovaných odborníků z oddělení CFD společnosti DOOSAN ŠKODA POWER. V následující tabulce lze vidět základní údaje týkající se nastavení programu ANSYS FLUENT pro řešení dané úlohy.

Tab. 3.4: Hlavní parametry výpočtu

Typ úlohy	osově symetrická, stacionární
Použitý model	dvourovnicový turbulentní model k – omega SST
Řešič	Pressure-Based
Metoda řešení	Coupled (možnost použít pro široký rozsah tlakových poměrů)
Proudící médium	vzduch - ideální plyn
Vlastnosti proudícího média	dynamická vazkost $\eta = 1,789 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$ měrná tepelná kapacita $c_p = 1006,43 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$
Okrajové podmínky	vstup - celkový tlak $p_{c1} = 101325 \text{ Pa}$ - statický tlak $p_{s1}$ měněn dle tlakového poměru - teplota $T = 295,15 \text{ K}$
	výstup - statický tlak $p_{s2}$ jako parametr (pro verifikaci sítě použito 57000 Pa)

Důležitým krokem před provedením celého výpočtu je nastavení monitorů řešení. Pro danou úlohu bylo nastaveno sledování a zapisování následujících parametrů:

- rozdíl hmotnostního průtoku na vstupu a na výstupu,
- hmotnostní průtok na vstupu,
- dynamický tlak na vstupu.

Poté lze spustit výpočet.

### 3.2 Analýza a vyhodnocení průtočných charakteristik ostrohranných otvorů

Cílem použití programu ANSYS FLUENT je vyhodnocení průtočných charakteristik ostrohranných otvorů v závislosti na měnící se geometrii. Všechny měnící se geometrické rozměry jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tab. 3.5: Definování měnící se geometrie pro průměr ostrohranného otvoru 50 mm

Název veličiny	Značka veličiny	Hodnoty veličiny	Jednotka veličiny
průměr ostrohranného otvoru	$d$	50	[mm]
délka kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu	$l$	5, 25, 50, 75, 125	[mm]

Tab. 3.6: Definování měnící se geometrie pro průměr ostrohranného otvoru 80 mm

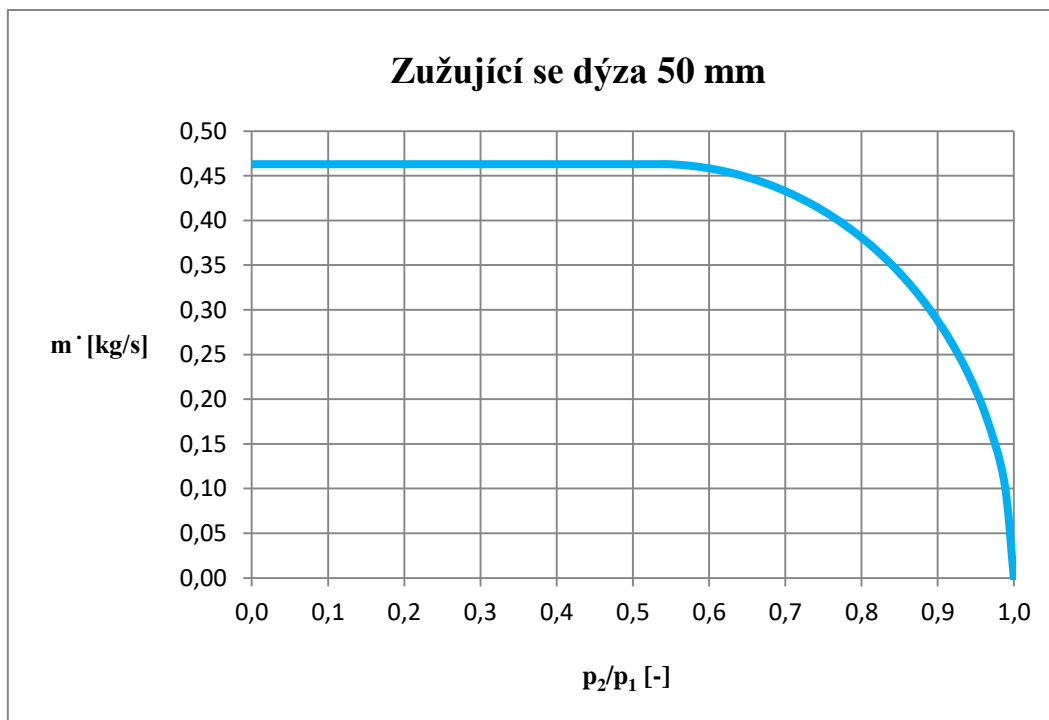
Název veličiny	Značka veličiny	Hodnoty veličiny	Jednotka veličiny
průměr ostrohranného otvoru	$d$	80	[mm]
délka kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu	$l$	8, 40, 80, 120, 200	[mm]

#### 3.2.1 Průtočné charakteristiky pro průměr ostrohranného otvoru 50 mm

V rámci dané kapitoly jsou vyčísleny a vykresleny průběhy hmotnostních průtoků v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu, který je umístěn v potrubí. Závislosti byly stanoveny za použití metody CFD. Průměr potrubí je 100 mm, průměr ostrohranného otvoru je 50 mm a délka kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu je dána jako parametr – 5 mm, 25 mm, 50 mm, 75 mm a 125 mm. Jako hlavní výstup jsou uvedeny průběhy průtokových součinitelů ostrohranného otvoru v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro příslušné geometrické rozměry.

Na Obr. 3.4 je vykreslen průběh hmotnostního průtoku v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro zužující se dýzu o výstupním průměru 50 mm.





Obr. 3.4: Vykreslení vypočteného průběhu hmotnostního průtoku v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro zužující se dýzu o rozměru  $d = 50$  mm

**Délka kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu 5 mm**

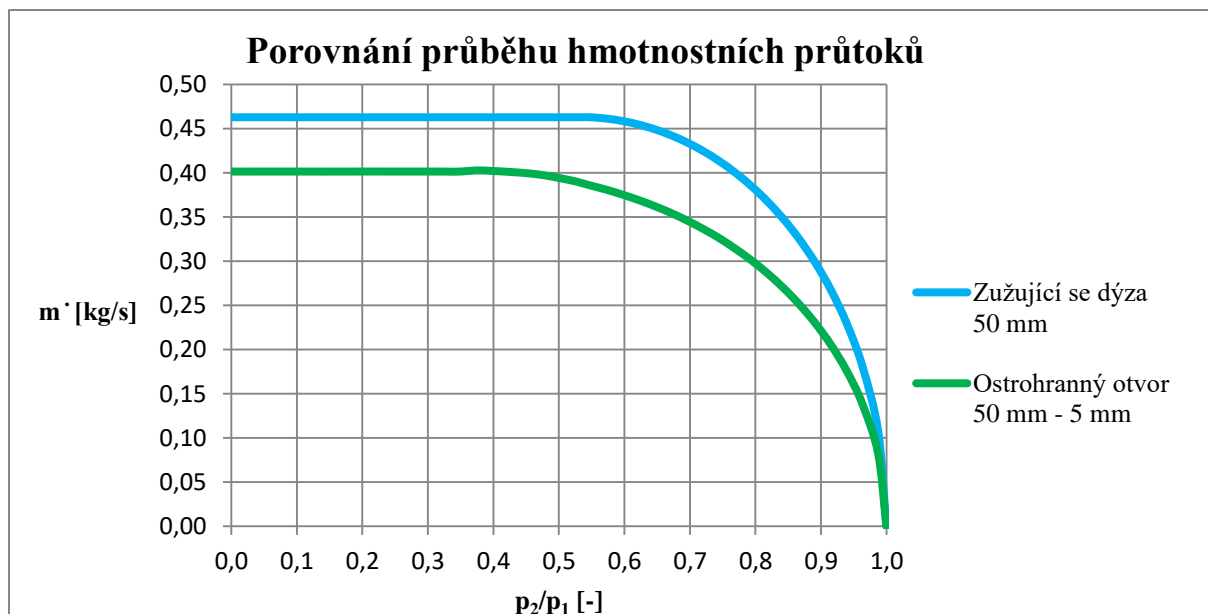
$$\frac{d}{D} = \frac{50}{100} = 0,5$$

$$\frac{l}{d} = \frac{5}{50} = 0,1$$

Tab. 3.7: Vyčíslení hmotnostních průtoků v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 50$  mm a  $l = 5$  mm

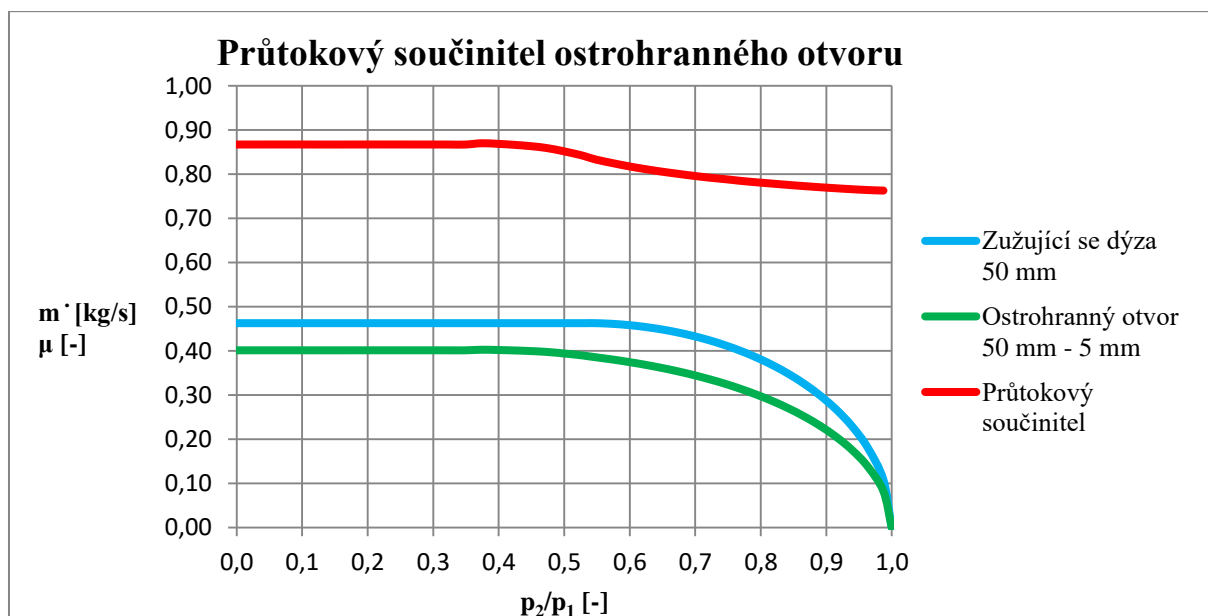
Vstupní dynamický tlak $p_{d1}$ [Pa]	Vstupní statický tlak $p_1$ [Pa]	Výstupní statický tlak $p_2$ [Pa]	Tlakový poměr $\frac{p_2}{p_1}$ [-]	Hmotnostní průtok $\dot{m}$ $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$
1101	100 224	0	0	0,40148
1101	100 224	2500	0,02	0,40149
1101	100 224	5000	0,05	0,40151
1101	100 224	7500	0,07	0,40152
1101	100 224	10000	0,10	0,40151
1101	100 224	12500	0,12	0,40147
1101	100 224	15000	0,15	0,40146
1101	100 224	17500	0,17	0,40149
1101	100 224	20000	0,20	0,40153

1101	100 224	22500	0,22	0,40153
1101	100 224	25000	0,25	0,40152
1101	100 224	27500	0,27	0,40150
1101	100 224	30000	0,30	0,40150
1101	100 224	32500	0,32	0,40147
1101	100 224	35000	0,35	0,40147
1101	100 224	37500	0,37	0,40280
1101	100 224	40000	0,40	0,40216
1099	100 226	42500	0,42	0,40114
1092	100 233	45000	0,45	0,39976
1081	100 244	47500	0,47	0,39775
1063	100 262	50000	0,50	0,39448
1042	100 283	52500	0,52	0,39067
1032	100 293	53528,15	0,53	0,38872
1016	100 309	55000	0,55	0,38573
990	100 335	57500	0,57	0,38083
961	100 364	60000	0,60	0,37522
929	100 396	62500	0,62	0,36902
894	100 431	65000	0,65	0,36210
857	100 468	67500	0,67	0,35444
815	100 510	70000	0,70	0,34582
771	100 554	72500	0,72	0,33626
723	100 602	75000	0,75	0,32579
671	100 654	77500	0,77	0,31384
616	100 709	80000	0,79	0,30073
557	100 768	82500	0,82	0,28610
495	100 830	85000	0,84	0,26966
429	100 896	87500	0,87	0,25110
359	100 966	90000	0,89	0,22992
286	101 039	92500	0,92	0,20528
210	101 115	95000	0,94	0,17574
130	101 195	97500	0,96	0,13819
46	101 279	100000	0,99	0,08228
0	101 325	101325	1,00	0



Obr. 3.5: Porovnání průběhu hmotnostních průtoků v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro zužující se dýzu a pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 50$  mm a  $l = 5$  mm

Nyní je možné provést vykreslení průtokového součinitele ostrohranného otvoru dle vztahu  $\mu = \frac{\dot{m}_o}{\dot{m}_d}$ .



Obr. 3.6: Vykreslení průběhu průtokového součinitele ostrohranného otvoru v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro rozměry kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu  $d = 50$  mm a  $l = 5$  mm

### Délka kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu 25 mm

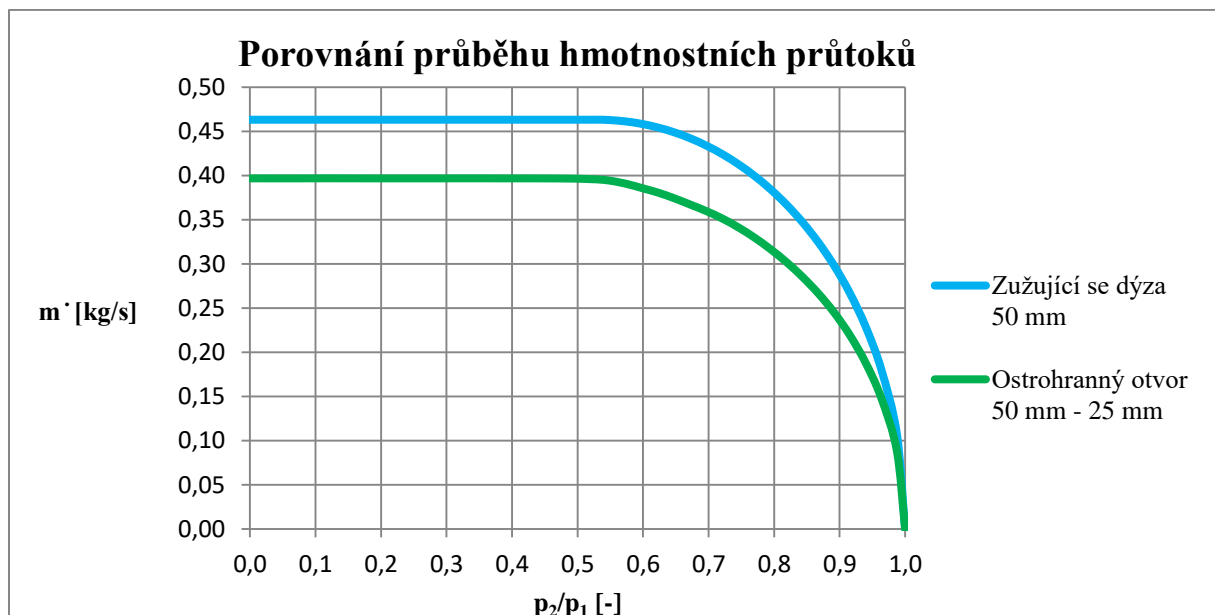
$$\frac{d}{D} = \frac{50}{100} = 0,5$$

$$\frac{l}{d} = \frac{25}{50} = 0,5$$

Tab. 3.8: Vyčíslení hmotnostních průtoků v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 50$  mm a  $l = 25$  mm

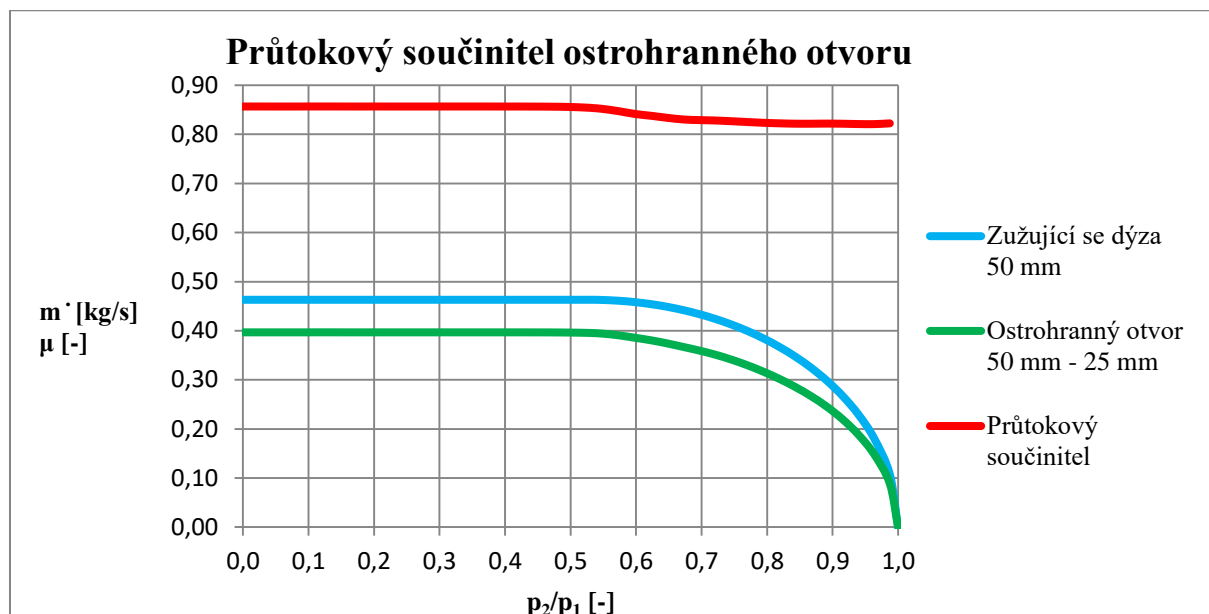
Vstupní dynamický tlak $p_{d1}$ [Pa]	Vstupní statický tlak $p_1$ [Pa]	Výstupní statický tlak $p_2$ [Pa]	Tlakový poměr $\frac{p_2}{p_1}$ [-]	Hmotnostní průtok $\dot{m}$ $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$
1075	100 250	0	0	0,39673
1075	100 250	2500	0,02	0,39673
1075	100 250	5000	0,05	0,39672
1075	100 250	7500	0,07	0,39672
1075	100 250	10000	0,10	0,39676
1075	100 250	12500	0,12	0,39677
1075	100 250	15000	0,15	0,39675
1075	100 250	17500	0,17	0,39672
1075	100 250	20000	0,20	0,39673
1075	100 250	22500	0,22	0,39672
1075	100 250	25000	0,25	0,39672
1075	100 250	27500	0,27	0,39672
1075	100 250	30000	0,30	0,39673
1075	100 250	32500	0,32	0,39675
1075	100 250	35000	0,35	0,39674
1075	100 250	37500	0,37	0,39673
1075	100 250	40000	0,40	0,39672
1075	100 250	42500	0,42	0,39671
1075	100 250	45000	0,45	0,39667
1074	100 251	47500	0,47	0,39655
1073	100 252	50000	0,50	0,39631
1069	100 256	52500	0,52	0,39572
1067	100 258	53528,15	0,53	0,39528
1061	100 264	55000	0,55	0,39420
1042	100 283	57500	0,57	0,39072

1016	100 309	60000	0,60	0,38572
988	100 337	62500	0,62	0,38056
955	100 370	65000	0,65	0,37416
919	100 406	67500	0,67	0,36696
882	100 443	70000	0,70	0,35954
840	100 485	72500	0,72	0,35106
793	100 532	75000	0,75	0,34099
739	100 586	77500	0,77	0,32945
682	100 643	80000	0,79	0,31636
620	100 705	82500	0,82	0,30170
553	100 772	85000	0,84	0,28514
483	100 842	87500	0,87	0,26638
407	100 918	90000	0,89	0,24474
326	100 999	92500	0,92	0,21906
240	101 085	95000	0,94	0,18789
149	101 176	97500	0,96	0,14806
53	101 272	100000	0,99	0,08845
0	101 325	101325	1,00	0



Obr. 3.7: Porovnání průběhu hmotnostních průtoků v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro zužující se dýzu a pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 50$  mm a  $l = 25$  mm

Nyní je možné provést vykreslení průtokového součinitele ostrohranného otvoru dle vztahu  $\mu = \frac{\dot{m}_o}{\dot{m}_d}$ .



Obr. 3.8: Vykreslení průběhu průtokového součinitele ostrohranného otvoru v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro rozměry kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu  $d = 50$  mm a  $l = 25$  mm

#### Délka kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu 50 mm

$$\frac{d}{D} = \frac{50}{100} = 0,5$$

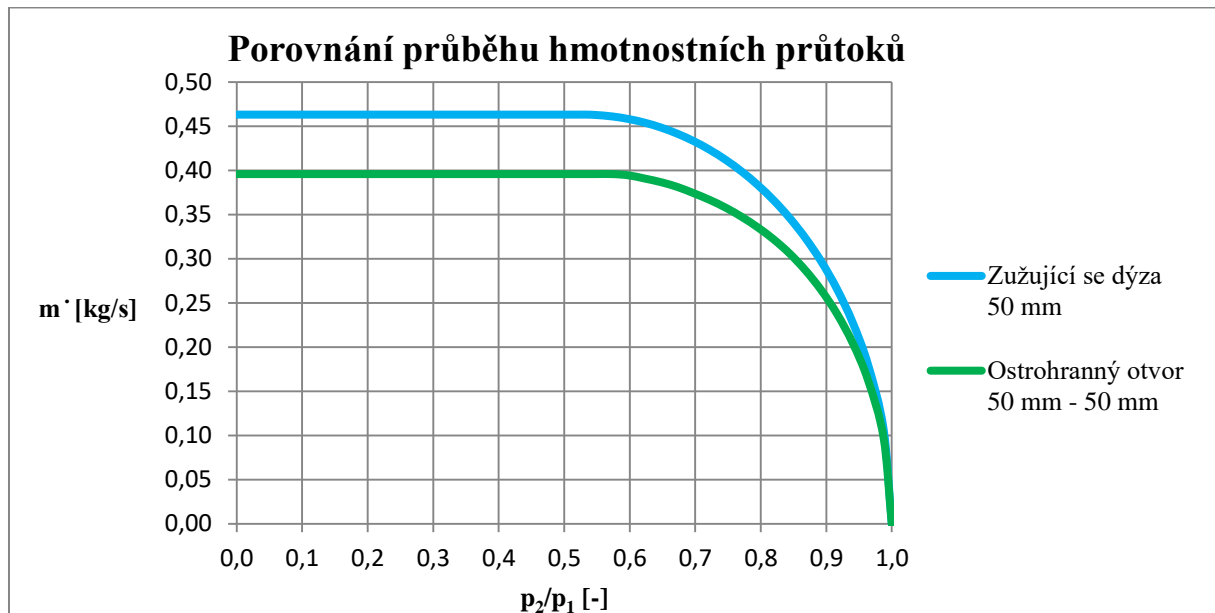
$$\frac{l}{d} = \frac{50}{50} = 1$$

Tab. 3.9: Vyčíslení hmotnostních průtoků v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 50$  mm a  $l = 50$  mm

Vstupní dynamický tlak $p_{d1}$ [Pa]	Vstupní statický tlak $p_1$ [Pa]	Výstupní statický tlak $p_2$ [Pa]	Tlakový poměr $\frac{p_2}{p_1}$ [-]	Hmotnostní průtok $\dot{m}$ $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$
1070	100 255	0	0	0,39580
1070	100 255	2500	0,02	0,39579
1070	100 255	5000	0,05	0,39578
1070	100 255	7500	0,07	0,39578
1070	100 255	10000	0,10	0,39578
1070	100 255	12500	0,12	0,39579
1070	100 255	15000	0,15	0,39578

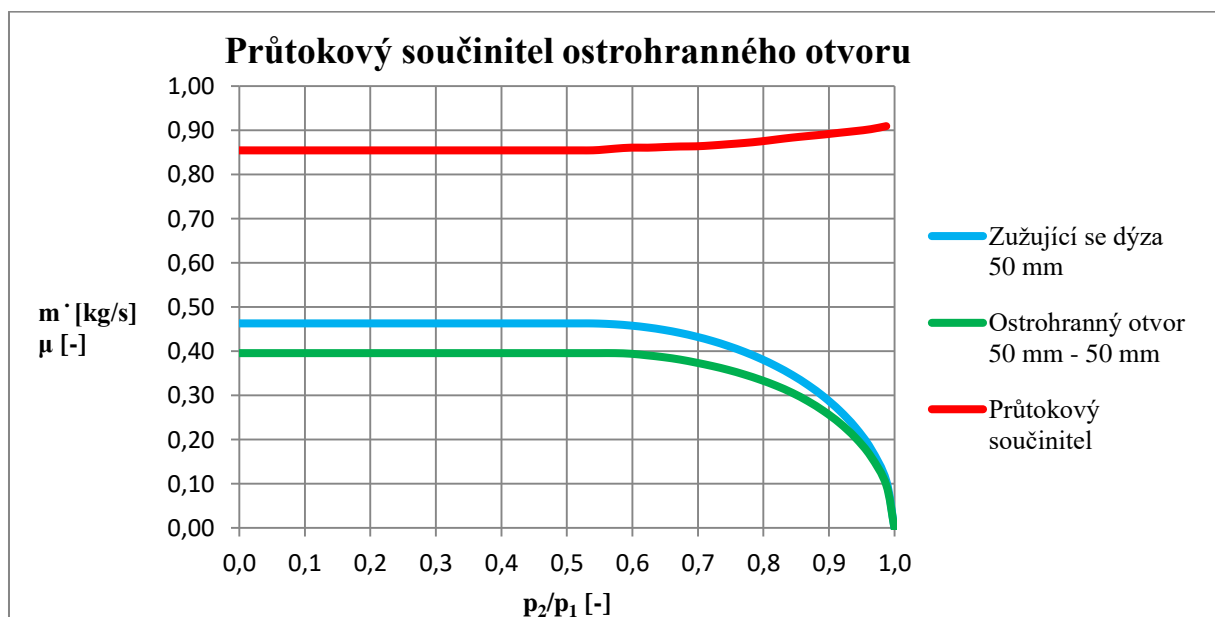
1070	100 255	17500	0,17	0,39579
1070	100 255	20000	0,20	0,39579
1070	100 255	22500	0,22	0,39579
1070	100 255	25000	0,25	0,39579
1070	100 255	27500	0,27	0,39579
1070	100 255	30000	0,30	0,39579
1070	100 255	32500	0,32	0,39579
1070	100 255	35000	0,35	0,39579
1070	100 255	37500	0,37	0,39579
1070	100 255	40000	0,40	0,39579
1070	100 255	42500	0,42	0,39579
1070	100 255	45000	0,45	0,39579
1070	100 255	47500	0,47	0,39579
1070	100 255	50000	0,50	0,39579
1070	100 255	52500	0,52	0,39579
1070	100 255	53528,15	0,53	0,39579
1070	100 255	55000	0,55	0,39579
1070	100 255	57500	0,57	0,39579
1062	100 263	60000	0,60	0,39434
1042	100 283	62500	0,62	0,39069
1020	100 305	65000	0,65	0,38658
992	100 333	67500	0,67	0,38120
956	100 369	70000	0,70	0,37421
917	100 408	72500	0,72	0,36656
873	100 452	75000	0,75	0,35772
822	100 503	77500	0,77	0,34732
767	100 558	80000	0,80	0,33541
705	100 620	82500	0,82	0,32181
637	100 688	85000	0,84	0,30582
560	100 765	87500	0,87	0,28679
475	100 850	90000	0,89	0,26438
384	100 941	92500	0,92	0,23769
285	101 040	95000	0,94	0,20482
178	101 147	97500	0,96	0,16217

64	101 261	100000	0,99	0,09739
0	101 325	101325	1,00	0



Obr. 3.9: Porovnání průběhu hmotnostních průtoků v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro zužující se dýzu a pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 50$  mm a  $l = 50$  mm

Nyní je možné provést vykreslení průtokového součinitele ostrohranného otvoru dle vztahu  $\mu = \frac{\dot{m}_o}{\dot{m}_d}$ .



Obr. 3.10: Vykreslení průběhu průtokového součinitele ostrohranného otvoru v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro rozměry kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu  $d = 50$  mm a  $l = 50$  mm



### Délka kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu 75 mm

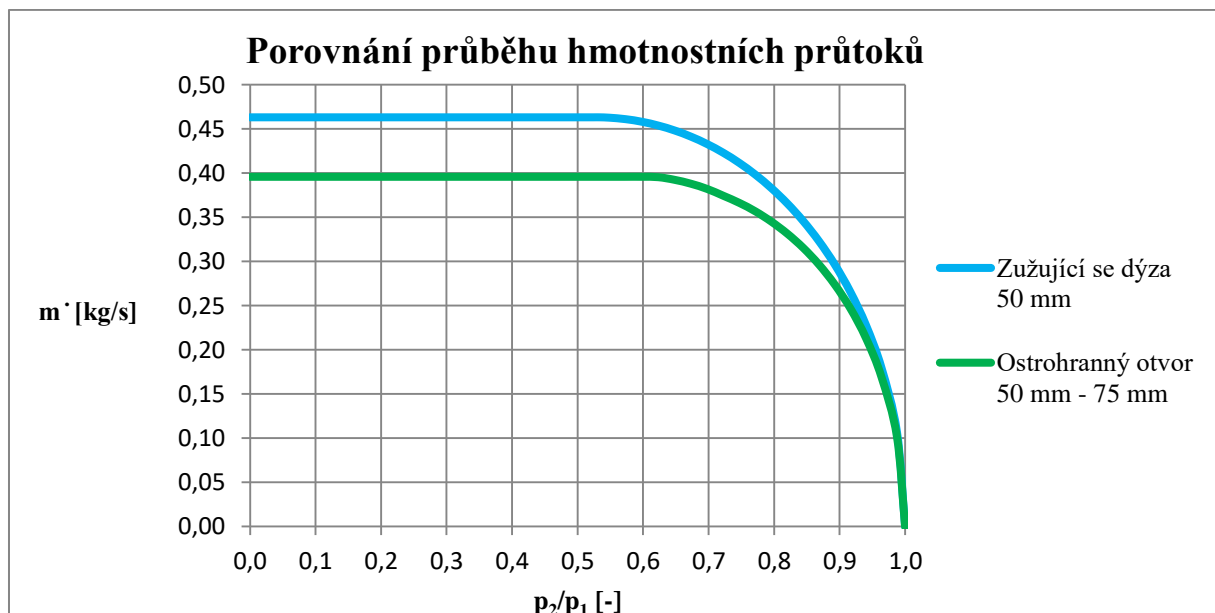
$$\frac{d}{D} = \frac{50}{100} = 0,5$$

$$\frac{l}{d} = \frac{75}{50} = 1,5$$

Tab. 3.10: Vyčíslení hmotnostních průtoků v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 50$  mm a  $l = 75$  mm

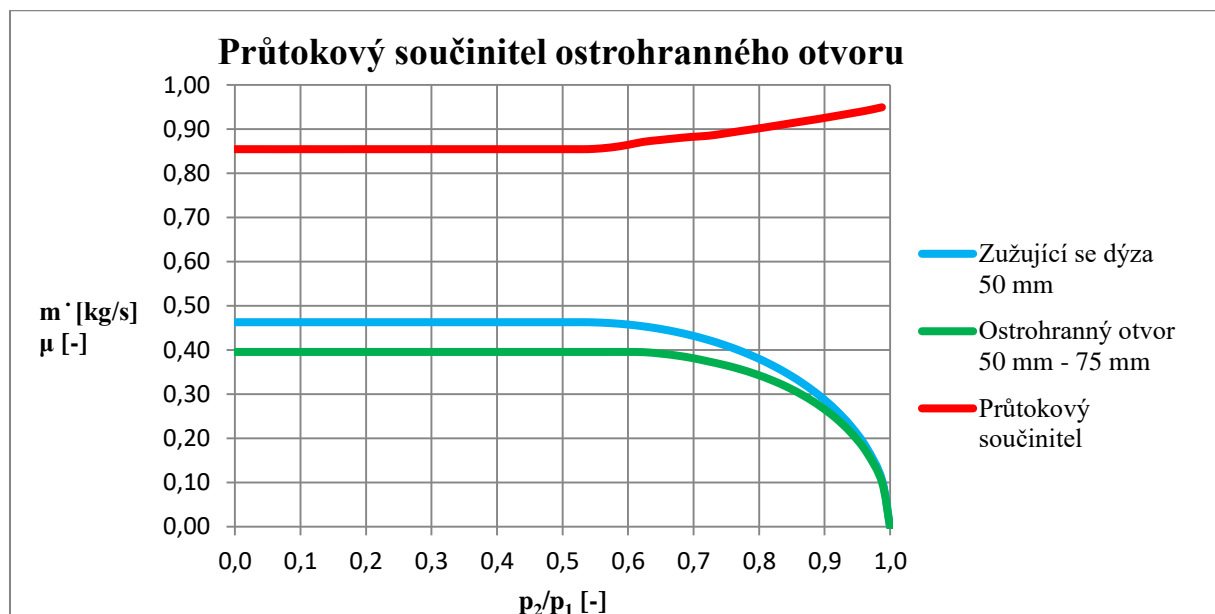
Vstupní dynamický tlak $p_{d1}$ [Pa]	Vstupní statický tlak $p_1$ [Pa]	Výstupní statický tlak $p_2$ [Pa]	Tlakový poměr $\frac{p_2}{p_1}$ [-]	Hmotnostní průtok $\dot{m}$ $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$
1070	100 255	0	0	0,39579
1070	100 255	2500	0,02	0,39579
1070	100 255	5000	0,05	0,39579
1070	100 255	7500	0,07	0,39577
1070	100 255	10000	0,10	0,39579
1070	100 255	12500	0,12	0,39579
1070	100 255	15000	0,15	0,39577
1070	100 255	17500	0,17	0,39579
1070	100 255	20000	0,20	0,39579
1070	100 255	22500	0,22	0,39579
1070	100 255	25000	0,25	0,39579
1070	100 255	27500	0,27	0,39579
1070	100 255	30000	0,30	0,39579
1070	100 255	32500	0,32	0,39579
1070	100 255	35000	0,35	0,39579
1070	100 255	37500	0,37	0,39579
1070	100 255	40000	0,40	0,39579
1070	100 255	42500	0,42	0,39579
1070	100 255	45000	0,45	0,39579
1070	100 255	47500	0,47	0,39579
1070	100 255	50000	0,50	0,39579
1070	100 255	52500	0,52	0,39579
1070	100 255	53528,15	0,53	0,39579
1070	100 255	55000	0,55	0,39579
1070	100 255	57500	0,57	0,39579

1070	100 255	60000	0,60	0,39579
1067	100 258	62500	0,62	0,39534
1051	100 274	65000	0,65	0,39234
1028	100 297	67500	0,67	0,38796
996	100 329	70000	0,70	0,38207
956	100 369	72500	0,72	0,37439
915	100 410	75000	0,75	0,36627
867	100 458	77500	0,77	0,35665
811	100 514	80000	0,80	0,34503
748	100 577	82500	0,82	0,33138
677	100 648	85000	0,84	0,31535
598	100 727	87500	0,87	0,29635
510	100 815	90000	0,89	0,27374
413	100 912	92500	0,92	0,24662
308	101 017	95000	0,94	0,21297
194	101 131	97500	0,96	0,16889
70	101 255	100000	0,99	0,10144
0	101 325	101325	1,00	0



Obr. 3.11: Porovnání průběhu hmotnostních průtoků v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro zužující se dýzu a pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 50$  mm a  $l = 75$  mm

Nyní je možné provést vykreslení průtokového součinitele ostrohranného otvoru dle vztahu  $\mu = \frac{\dot{m}_o}{\dot{m}_d}$ .



Obr. 3.12: Vykreslení průběhu průtokového součinitele ostrohranného otvoru v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro rozměry kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu  $d = 50$  mm a  $l = 75$  mm

### Délka kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu 125 mm

$$\frac{d}{D} = \frac{50}{100} = 0,5$$

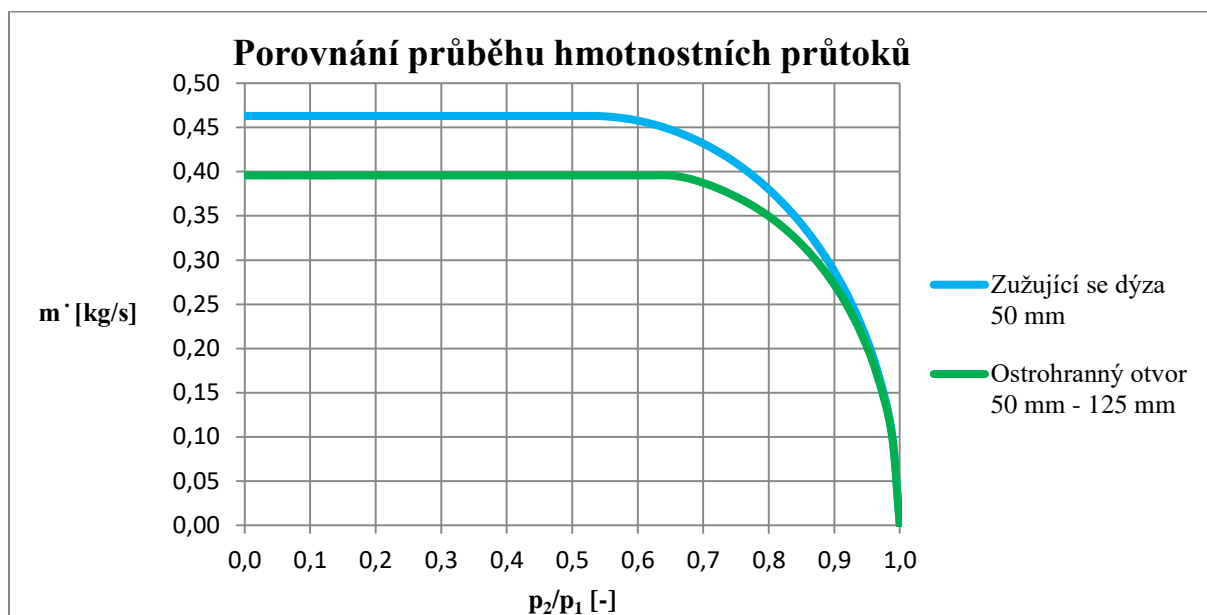
$$\frac{l}{d} = \frac{125}{50} = 2,5$$

Tab. 3.11: Vyčíslení hmotnostních průtoků v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 50$  mm a  $l = 125$  mm

Vstupní dynamický tlak $p_{d1}$ [Pa]	Vstupní statický tlak $p_1$ [Pa]	Výstupní statický tlak $p_2$ [Pa]	Tlakový poměr $\frac{p_2}{p_1}$ [-]	Hmotnostní průtok $\dot{m}$ $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$
1070	100 255	0	0	0,39578
1070	100 255	2500	0,02	0,39578
1070	100 255	5000	0,05	0,39574
1070	100 255	7500	0,07	0,39577
1070	100 255	10000	0,10	0,39573
1070	100 255	12500	0,12	0,39565
1070	100 255	15000	0,15	0,39579

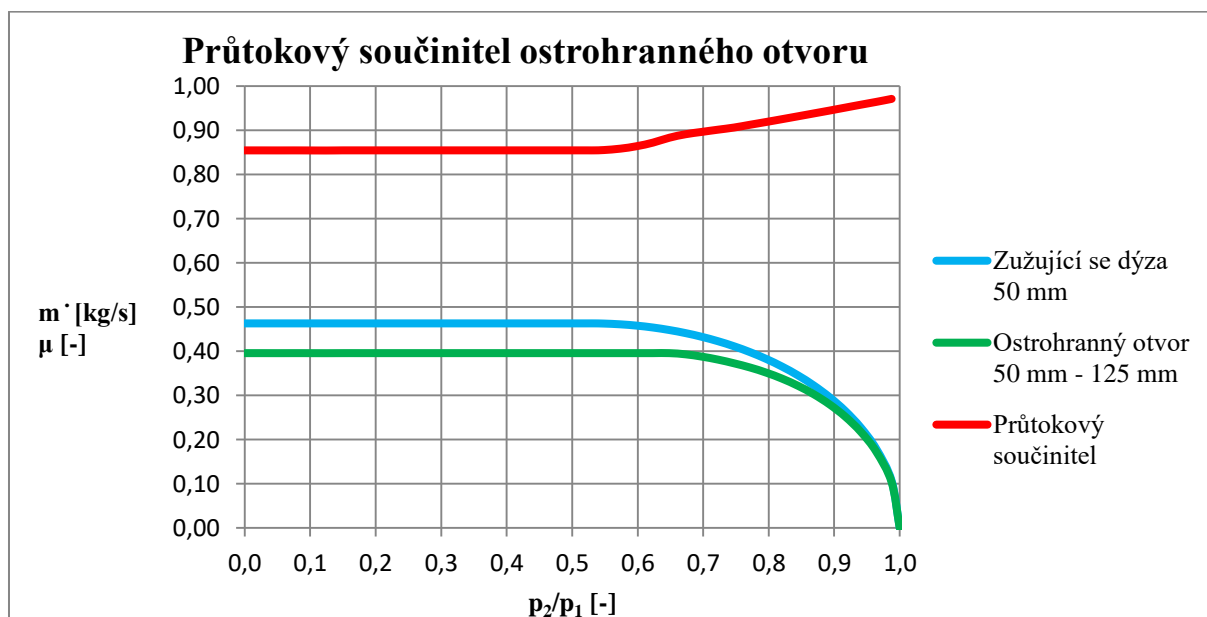
1070	100 255	17500	0,17	0,39579
1070	100 255	20000	0,20	0,39579
1070	100 255	22500	0,22	0,39579
1070	100 255	25000	0,25	0,39579
1070	100 255	27500	0,27	0,39579
1070	100 255	30000	0,30	0,39579
1070	100 255	32500	0,32	0,39579
1070	100 255	35000	0,35	0,39579
1070	100 255	37500	0,37	0,39579
1070	100 255	40000	0,40	0,39579
1070	100 255	42500	0,42	0,39579
1070	100 255	45000	0,45	0,39579
1070	100 255	47500	0,47	0,39579
1070	100 255	50000	0,50	0,39579
1070	100 255	52500	0,52	0,39579
1070	100 255	53528,15	0,53	0,39579
1070	100 255	55000	0,55	0,39579
1070	100 255	57500	0,57	0,39579
1070	100 255	60000	0,60	0,39579
1070	100 255	62500	0,62	0,39579
1070	100 255	65000	0,65	0,39579
1055	100 270	67500	0,67	0,39309
1027	100 298	70000	0,70	0,38789
991	100 334	72500	0,72	0,38112
948	100 377	75000	0,75	0,37272
900	100 425	77500	0,77	0,36317
843	100 482	80000	0,80	0,35165
778	100 547	82500	0,82	0,33797
705	100 620	85000	0,84	0,32180
623	100 702	87500	0,87	0,30261
532	100 793	90000	0,89	0,27972
432	100 893	92500	0,92	0,25209
322	101 003	95000	0,94	0,21776
202	101 123	97500	0,96	0,17269

73	101 252	100000	0,99	0,10362
0	101 325	101325	1,00	0



Obr. 3.13: Porovnání průběhu hmotnostních průtoků v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro zužující se dýzu a pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 50$  mm a  $l = 125$  mm

Nyní je možné provést vykreslení průtokového součinitele ostrohranného otvoru dle vztahu  $\mu = \frac{\dot{m}_o}{\dot{m}_d}$ .



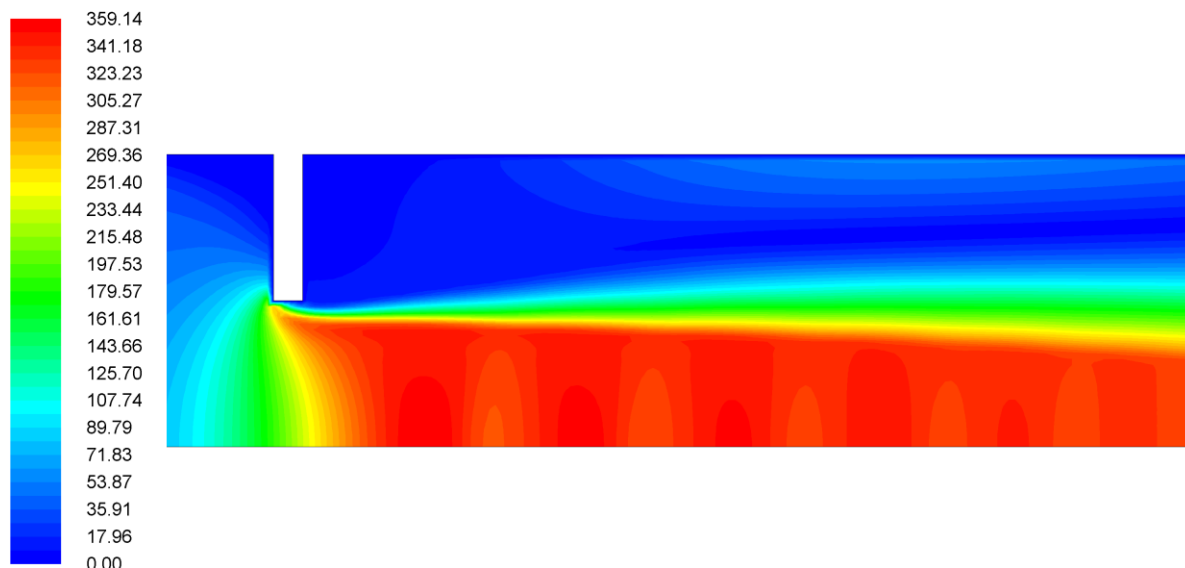
Obr. 3.14: Vykreslení průběhu průtokového součinitele ostrohranného otvoru v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro rozměry kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu  $d = 50$  mm a  $l = 125$  mm

### Vyhodnocení průtočných charakteristik pro průměr ostrohranného otvoru 50 mm

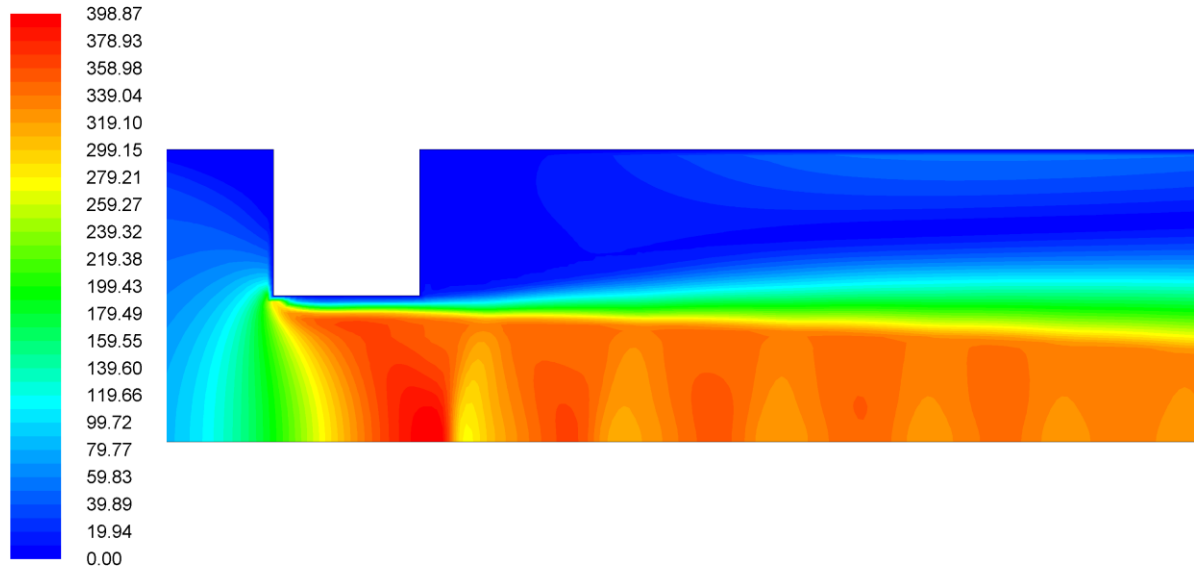
Výše uvedené údaje ukázaly, že pro délky kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu 50 mm, 75 mm a 125 mm se druhý kritický tlakový poměr pohybuje okolo hodnot 0,6 až 0,65. Při dosažení daného druhého kritického tlakového poměru se již hmotnostní průtok ostrohranným otvorem nezvyšuje. Oproti tomu se pro menší délky kanálů tato hranice posouvá směrem k nižším tlakovým poměrům - například pro délku kanálu 5 mm je hranice konstantního hmotnostního průtoku vytyčena hodnotou 0,35. Na základě toho lze usuzovat, že pro kanály s ostrohranným otvorem na vstupu, které mají zanedbatelnou délku, by byl druhý kritický tlakový poměr ještě menší.

Výsledky metodou CFD jsou ve značném rozporu s literaturou [5]. Literatura uvádí, že druhý kritický tlakový poměr pro  $\frac{l}{d} = 1$  je roven hodnotě 0,18. Hodnota byla stanovena pro vzduch a na základě experimentu. Metoda CFD však ukázala, že pro  $\frac{l}{d} = 1$  je druhý kritický tlakový poměr roven číslu 0,57. Daný nesoulad je pravděpodobně dán tím, že literatura nepojednává o ostrohranném otvoru umístěném v potrubí, ale o výtoku z nádoby, kde je zanedbána vstupní rychlost. Jak již bylo zmíněno, žádné příslušné experimentální výsledky, za pomoci kterých by se daly validovat hodnoty stanovené metodou CFD, nebyly nalezeny.

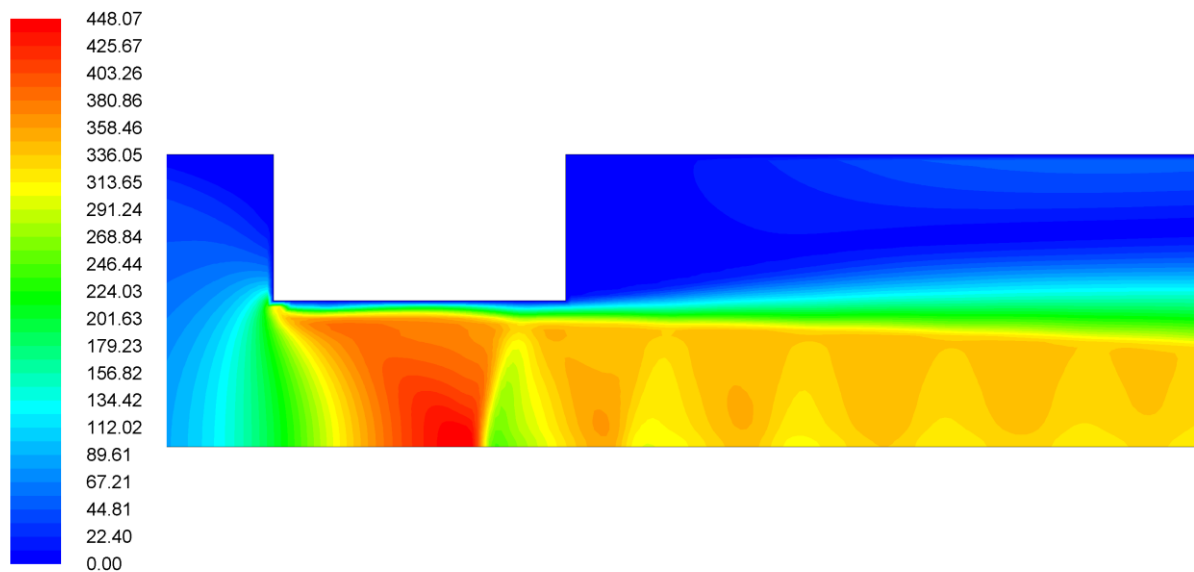
Sada níže uvedených obrázků poukazuje na zvyšování rychlosti v místě ostrohranného otvoru za stejného tlakového poměru v závislosti na změně délky kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu až do hranice  $458,21 \frac{m}{s}$ . Dále je na nich vidět, proč dochází při zvětšování délek kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu ke zvyšování druhého kritického tlakového poměru, což znamená dřívější ustálení hodnoty hmotnostního průtoku ostrohranným otvorem. Na obrázcích lze daný jev zpozorovat dle polohy „Vena Contracta“ oproti kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu. Pojem „Vena Contracta“ označuje místo nejužšího průřezu toku tekutiny s nejvyšší rychlostí.



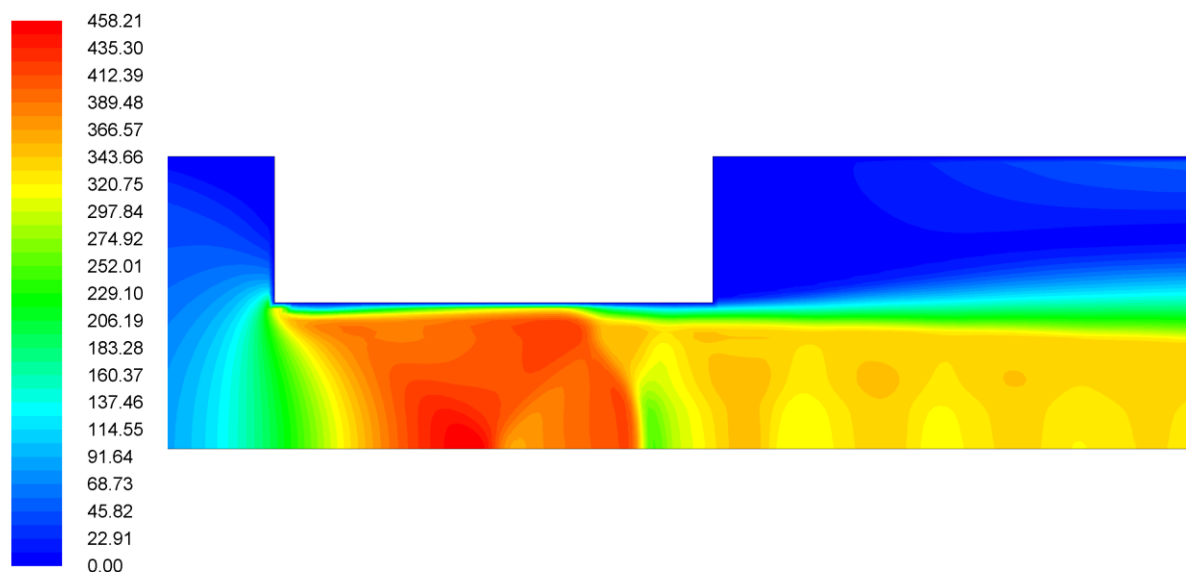
Obr. 3.15: Průběh rychlosti pro tlakový poměr 0,59 (kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 50$  mm a  $l = 5$  mm)



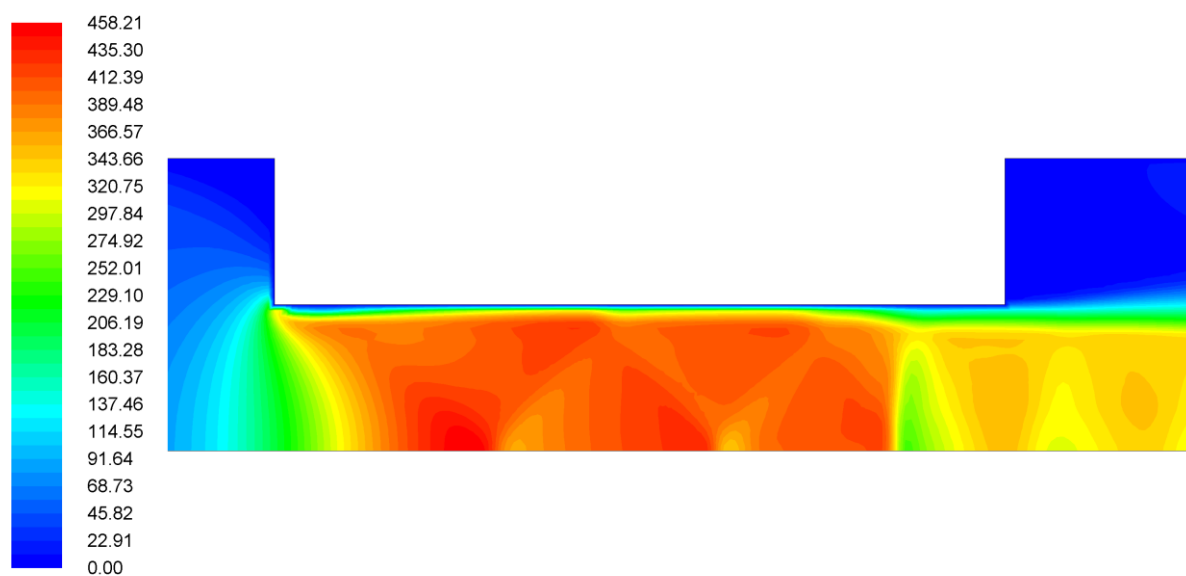
Obr. 3.16: Průběh rychlosti pro tlakový poměr 0,59 (kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 50$  mm a  $l = 25$  mm)



Obr. 3.17: Průběh rychlosti pro tlakový poměr 0,59 (kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 50$  mm a  $l = 50$  mm)



Obr. 3.18: Průběh rychlosti pro tlakový poměr 0,59 (kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 50$  mm a  $l = 75$  mm)



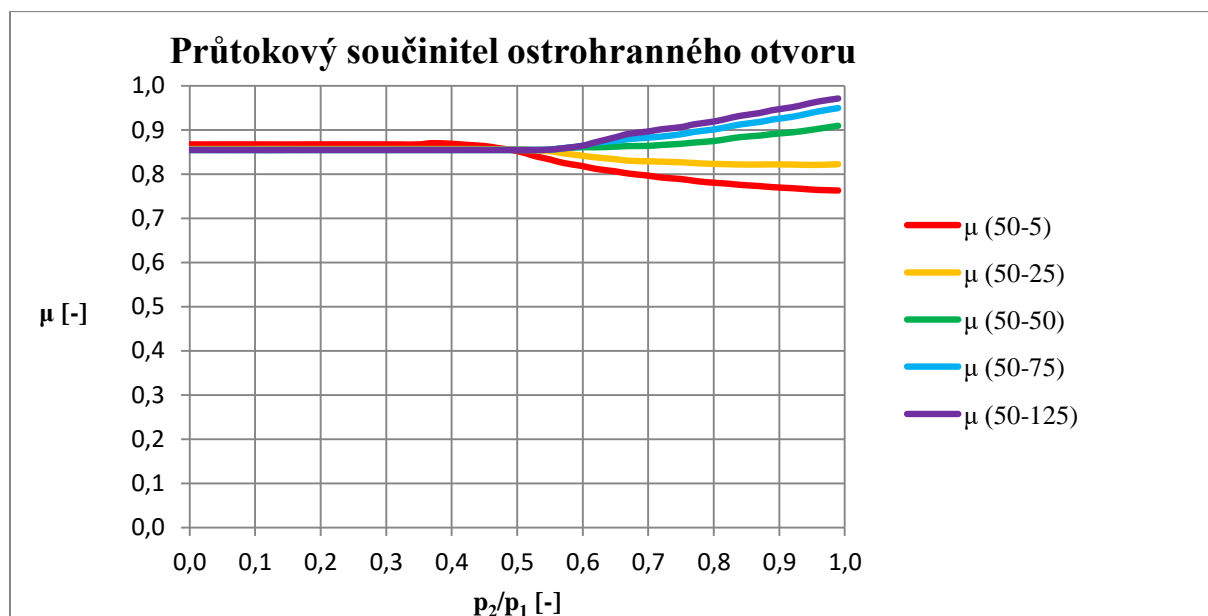
Obr. 3.19: Průběh rychlosti pro tlakový poměr 0,59 (kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 50$  mm a  $l = 125$  mm)



Tab. 3.12: Vyčíslení průtokových součinitelů ostrohranného otvoru pro různé délky kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu o průměru  $d = 50$  mm v závislosti na měnícím se tlakovém poměru

$\frac{p_2}{p_1}$ [-]	$\mu_{50-5}$ [-]	$\frac{p_2}{p_1}$ [-]	$\mu_{50-25}$ [-]	$\frac{p_2}{p_1}$ [-]	$\mu_{50-50}$ [-]	$\frac{p_2}{p_1}$ [-]	$\mu_{50-75}$ [-]	$\frac{p_2}{p_1}$ [-]	$\mu_{50-125}$ [-]
0	0,86723	0	0,85675	0	0,85470	0	0,85467	0	0,85465
0,02	0,86725	0,02	0,85675	0,02	0,85468	0,02	0,85467	0,02	0,85465
0,05	0,86730	0,05	0,85673	0,05	0,85465	0,05	0,85467	0,05	0,85457
0,07	0,86732	0,07	0,85673	0,07	0,85465	0,07	0,85463	0,07	0,85463
0,1	0,86730	0,1	0,85681	0,1	0,85465	0,1	0,85467	0,1	0,85455
0,12	0,86721	0,12	0,85683	0,12	0,85468	0,12	0,85467	0,12	0,85437
0,15	0,86719	0,15	0,85679	0,15	0,85465	0,15	0,85463	0,15	0,85468
0,17	0,86725	0,17	0,85673	0,17	0,85468	0,17	0,85467	0,17	0,85468
0,2	0,86734	0,2	0,85675	0,2	0,85468	0,2	0,85467	0,2	0,85468
0,22	0,86734	0,22	0,85673	0,22	0,85468	0,22	0,85467	0,22	0,85468
0,25	0,86732	0,25	0,85673	0,25	0,85468	0,25	0,85467	0,25	0,85468
0,27	0,86727	0,27	0,85673	0,27	0,85468	0,27	0,85467	0,27	0,85468
0,3	0,86727	0,3	0,85675	0,3	0,85468	0,3	0,85467	0,3	0,85468
0,32	0,86721	0,32	0,85679	0,32	0,85468	0,32	0,85467	0,32	0,85468
0,35	0,86721	0,35	0,85677	0,35	0,85468	0,35	0,85467	0,35	0,85468
0,37	0,87008	0,37	0,85675	0,37	0,85468	0,37	0,85467	0,37	0,85468
0,4	0,86870	0,4	0,85673	0,4	0,85468	0,4	0,85467	0,4	0,85468
0,42	0,86650	0,42	0,85670	0,42	0,85468	0,42	0,85467	0,42	0,85468
0,45	0,86352	0,45	0,85662	0,45	0,85468	0,45	0,85467	0,45	0,85468
0,47	0,85917	0,47	0,85636	0,47	0,85468	0,47	0,85467	0,47	0,85468
0,5	0,85211	0,5	0,85584	0,5	0,85468	0,5	0,85467	0,5	0,85468
0,52	0,84388	0,52	0,85457	0,52	0,85468	0,52	0,85467	0,52	0,85468
0,53	0,83967	0,53	0,85362	0,53	0,85468	0,53	0,85467	0,53	0,85468
0,55	0,83324	0,55	0,85194	0,55	0,85545	0,55	0,85545	0,55	0,85545
0,57	0,82537	0,57	0,84729	0,57	0,85856	0,57	0,85855	0,57	0,85856
0,6	0,81815	0,6	0,84160	0,6	0,86087	0,6	0,86412	0,6	0,86412
0,62	0,81185	0,62	0,83786	0,62	0,86076	0,62	0,87128	0,62	0,87230
0,65	0,80621	0,65	0,83375	0,65	0,86219	0,65	0,87541	0,65	0,88333
0,67	0,80126	0,67	0,83032	0,67	0,86347	0,67	0,87924	0,67	0,89122

0,7	0,79657	0,7	0,82906	0,7	0,86390	0,7	0,88262	0,7	0,89650
0,72	0,79235	0,72	0,82822	0,72	0,86595	0,72	0,88505	0,72	0,90151
0,75	0,78884	0,75	0,82675	0,75	0,86864	0,75	0,89012	0,75	0,90637
0,77	0,78490	0,77	0,82513	0,77	0,87142	0,77	0,89569	0,77	0,91270
0,79	0,78165	0,79	0,82356	0,8	0,87492	0,8	0,90098	0,8	0,91896
0,82	0,77862	0,82	0,82248	0,82	0,87932	0,82	0,90654	0,82	0,92532
0,84	0,77572	0,84	0,82174	0,84	0,88366	0,84	0,91235	0,84	0,93183
0,87	0,77300	0,87	0,82168	0,87	0,88717	0,87	0,91804	0,87	0,93832
0,89	0,77050	0,89	0,82195	0,89	0,89066	0,89	0,92366	0,89	0,94480
0,92	0,76816	0,92	0,82164	0,92	0,89456	0,92	0,92978	0,92	0,95144
0,94	0,76605	0,94	0,82102	0,94	0,89831	0,94	0,93584	0,94	0,95799
0,96	0,76419	0,96	0,82088	0,96	0,90267	0,96	0,94208	0,96	0,96440
0,99	0,76297	0,99	0,82243	0,99	0,90949	0,99	0,94949	0,99	0,97114



Obr. 3.20: Vykreslení průběhu průtokových součinitelů ostrohranného otvoru pro různé délky kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu o průměru  $d = 50$  mm v závislosti na měnícím se tlakovém poměru

U průběhu průtokového součinitele ostrohranného otvoru o průměru 50 mm pro délku kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu 5 mm je patrná shoda s průběhem průtokového součinitele ostrohranného otvoru  $\mu$ , který je znázorněn na grafu v příloze č. 1- Průtok normální clonou [6]. Graf v příloze je vyhotoven pro přehřátou páru.

Na Obr. 3.20 lze vidět vliv zvětšujícího se poměru  $\frac{l}{d}$  při zachování poměru  $\frac{d}{D} = 0,5$ . Pro tlakové poměry 0 až 0,5 jsou hodnoty průtokových součinitelů velmi podobné. Pro větší tlakové poměry se průběhy průtokových součinitelů značně liší. Pro délky kanálu s ostrohranným

otvorem na vstupu 5 mm a 25 mm má průtokový součinitel ostrohranného otvoru pro vyšší tlakové poměry klesající charakter. Pro délky kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu 50 mm, 75 mm a 125 mm přechází průtokový součinitel pro větší tlakové poměry z klesajícího charakteru do rostoucího.

### 3.2.2 Průtočné charakteristiky pro průměr ostrohranného otvoru 80 mm

Z důvodu optimálního porovnání dosažených výsledků je daná podkapitola provedena analogicky dle podkapitoly předchozí. Jsou zde vyčísleny a vykresleny průběhy hmotnostních průtoků v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu, který je umístěn v potrubí. Průměr potrubí je 100 mm, průměr ostrohranného otvoru je 80 mm a délka kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu je dána jako parametr – 8 mm, 40 mm, 80 mm, 120 mm a 200 mm. Jako hlavní výstup jsou uvedeny průběhy průtokových součinitelů ostrohranného otvoru v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro příslušné geometrické rozměry.

Při stanovení průtokových součinitelů ostrohranného otvoru pro poměr  $\frac{d}{D} = 0,8$  se projevil hrubý nedostatek plynoucí z výpočtu hmotnostního průtoku dýzou se zanedbáním vstupní rychlosti. V návaznosti na zjištění daného nedostatku je zapotřebí stanovit hmotnostní průtoky dýzou bez zanedbání vstupní rychlosti. Účelem této práce není odvozovat všechny příslušné vztahy, proto zde budou pouze uvedeny.

Důležité vztahy pro výpočet hmotnostního průtoku dýzou při zanedbání vstupní rychlosti jsou sepsány a vysvětleny v podkapitole 2.1.1 a 2.1.2.1. Při vlivu vstupní rychlosti mají vztahy následující tvar:

Zdroj: [2]

$$w_2 = \sqrt{2 \frac{\kappa \cdot r}{\kappa - 1} T_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] + w_1^2},$$

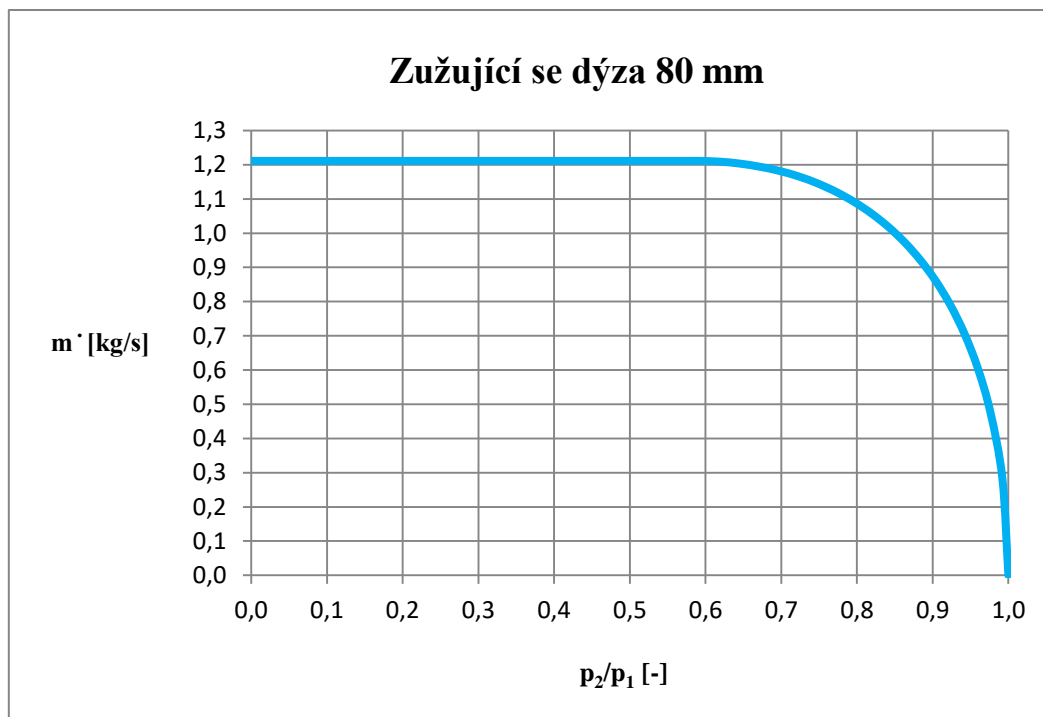
$$w_k = \sqrt{2 \left( \frac{\kappa}{\kappa + 1} \right) r \cdot T_1 + w_1^2 \left( \frac{\kappa - 1}{\kappa + 1} \right)},$$

$$\left( \frac{p_2}{p_1} \right)_k = \frac{p_k}{p_1} = \left[ 1 - \frac{\kappa \cdot r \cdot T_1 - w_1^2}{\kappa \cdot r \cdot T_1} \left( \frac{\kappa - 1}{\kappa + 1} \right) \right]^{\frac{\kappa}{\kappa-1}},$$

$$\rho_k = \frac{p_1}{r \cdot T_1} \left( \frac{p_k}{p_1} \right)^{\frac{1}{\kappa}}.$$

Vstupní rychlost je na počátku výpočtu neznámá, proto se použije metoda postupných aproximací (iterace). Pro první odhad je dána vstupní rychlost, která je určena metodou CFD pro příslušný ostrohranný otvor. Výpočet se v daném případě ustálí po třech krocích.

Na Obr. 3.21 je vykreslen průběh hmotnostního průtoku v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro zužující se dýzu o výstupním průměru 80 mm.



Obr. 3.21: Vykreslení vypočteného průběhu hmotnostního průtoku v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro zužující se dýzu o rozměru  $d = 80$  mm

**Délka kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu 8 mm**

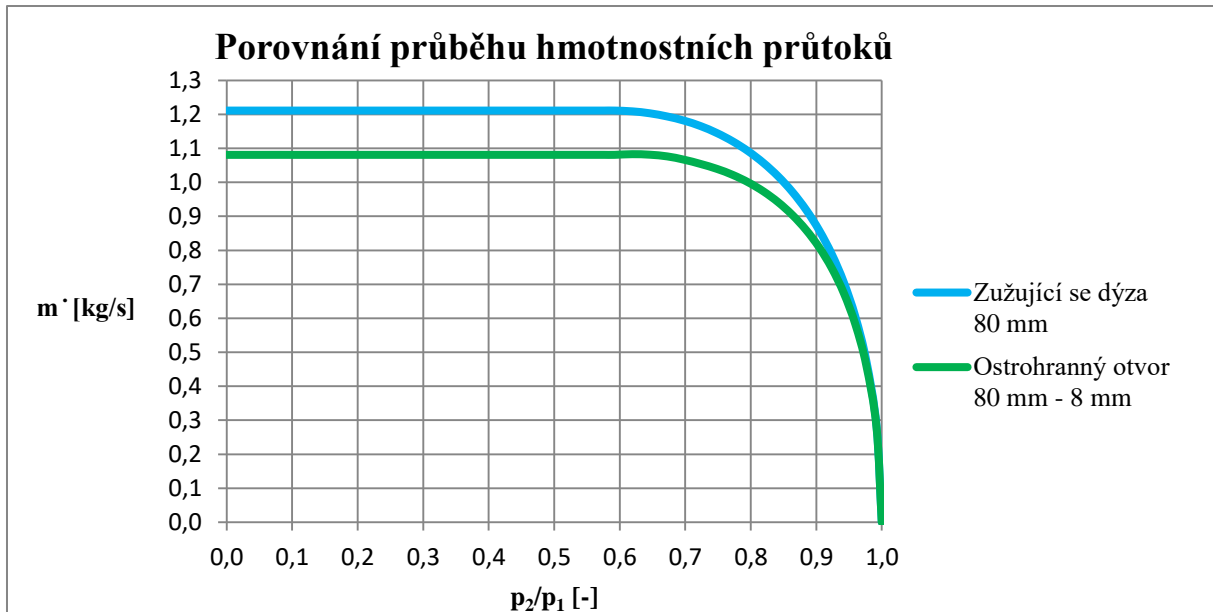
$$\frac{d}{D} = \frac{80}{100} = 0,8$$

$$\frac{l}{d} = \frac{8}{80} = 0,1$$

Tab. 3.13: Vyčíslení hmotnostních průtoků v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 80$  mm a  $l = 8$  mm

Vstupní dynamický tlak $p_{d1}$ [Pa]	Vstupní statický tlak $p_1$ [Pa]	Výstupní statický tlak $p_2$ [Pa]	Tlakový poměr $\frac{p_2}{p_1}$ [-]	Hmotnostní průtok $\dot{m}$ $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$
8445	92 880	0	0	1,08088
8445	92 880	2500	0,03	1,08088
8445	92 880	5000	0,05	1,08089
8445	92 880	7500	0,08	1,08092
8445	92 880	10000	0,11	1,08089
8445	92 880	12500	0,13	1,08089
8445	92 880	15000	0,16	1,08090
8445	92 880	17500	0,19	1,08091
8445	92 880	20000	0,22	1,08092

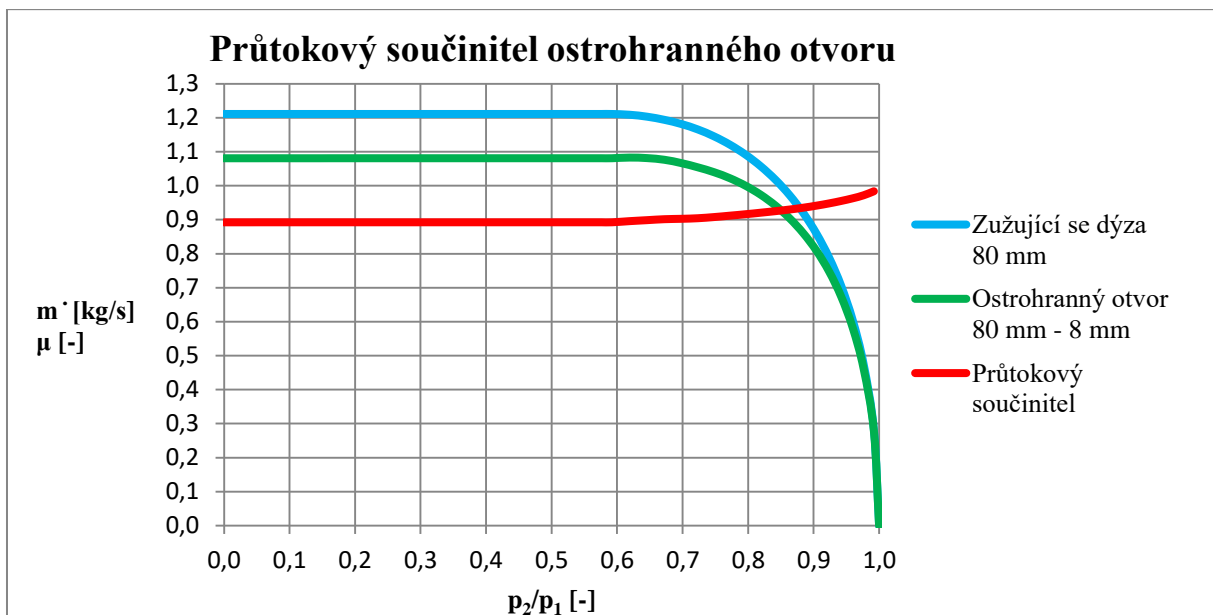
8445	92 880	22500	0,24	1,08090
8445	92 880	25000	0,27	1,08092
8445	92 880	27500	0,30	1,08092
8445	92 880	30000	0,32	1,08091
8445	92 880	32500	0,35	1,08091
8445	92 880	35000	0,38	1,08091
8445	92 880	37500	0,40	1,08091
8445	92 880	40000	0,43	1,08091
8445	92 880	42500	0,46	1,08091
8445	92 880	45000	0,48	1,08091
8445	92 880	47500	0,51	1,08091
8445	92 880	50000	0,54	1,08091
8445	92 880	52500	0,57	1,08091
8445	92 880	53528,15	0,58	1,08091
8445	92 880	55000	0,59	1,08093
8462	92 863	57500	0,62	1,08293
8438	92 887	60000	0,65	1,08132
8369	92 956	62500	0,67	1,07638
8208	93 117	65000	0,70	1,06668
8003	93 322	67500	0,72	1,05420
7770	93 555	70000	0,75	1,03969
7488	93 837	72500	0,77	1,02183
7149	94 176	75000	0,80	0,99981
6753	94 572	77500	0,82	0,97322
6297	95 028	80000	0,84	0,94154
5782	95 543	82500	0,86	0,90405
5211	96 114	85000	0,88	0,86017
4583	96 742	87500	0,90	0,80862
3895	97 430	90000	0,92	0,74744
3147	98 178	92500	0,94	0,67369
2336	98 989	95000	0,96	0,58216
1463	99 862	97500	0,98	0,46213
526	100 799	100000	0,99	0,27799
0	101 325	101325	1,00	0



Obr. 3.22: Porovnání průběhu hmotnostních průtoků v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro zužující se dýzu a pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 80$  mm a  $l = 8$  mm

Nyní je možné provést vykreslení průtokového součinitele ostrohranného otvoru dle vztahu

$$\mu = \frac{\dot{m}_o}{\dot{m}_d}$$



Obr. 3.23: Vykreslení průběhu průtokového součinitele ostrohranného otvoru v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro rozměry kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu  $d = 80$  mm a  $l = 8$  mm

**Délka kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu 40 mm**

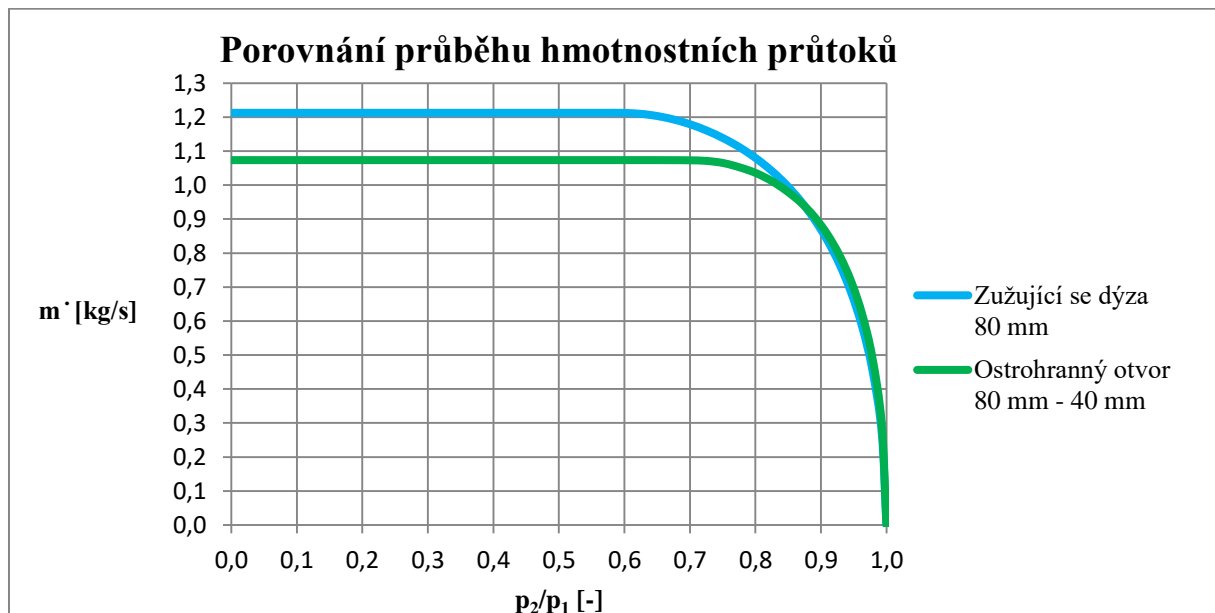
$$\frac{d}{D} = \frac{80}{100} = 0,8$$

$$\frac{l}{d} = \frac{40}{80} = 0,5$$

Tab. 3.14: Vyčíslení hmotnostních průtoků v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 80$  mm a  $l = 40$  mm

Vstupní dynamický tlak $p_{d1}$ [Pa]	Vstupní statický tlak $p_1$ [Pa]	Výstupní statický tlak $p_2$ [Pa]	Tlakový poměr $\frac{p_2}{p_1}$ [-]	Hmotnostní průtok $\dot{m}$ $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$
8322	93 003	0	0	1,07350
8322	93 003	2500	0,03	1,07352
8322	93 003	5000	0,05	1,07350
8322	93 003	7500	0,08	1,07355
8322	93 003	10000	0,11	1,07355
8322	93 003	12500	0,13	1,07355
8322	93 003	15000	0,16	1,07355
8322	93 003	17500	0,19	1,07355
8322	93 003	20000	0,22	1,07355
8322	93 003	22500	0,24	1,07355
8322	93 003	25000	0,27	1,07355
8322	93 003	27500	0,30	1,07355
8322	93 003	30000	0,32	1,07355
8322	93 003	32500	0,35	1,07355
8322	93 003	35000	0,38	1,07355
8322	93 003	37500	0,40	1,07355
8322	93 003	40000	0,43	1,07356
8322	93 003	42500	0,46	1,07357
8322	93 003	45000	0,48	1,07357
8322	93 003	47500	0,51	1,07355
8322	93 003	50000	0,54	1,07356
8322	93 003	52500	0,56	1,07357
8322	93 003	53528,15	0,58	1,07357
8322	93 003	55000	0,59	1,07357
8322	93 003	57500	0,62	1,07355

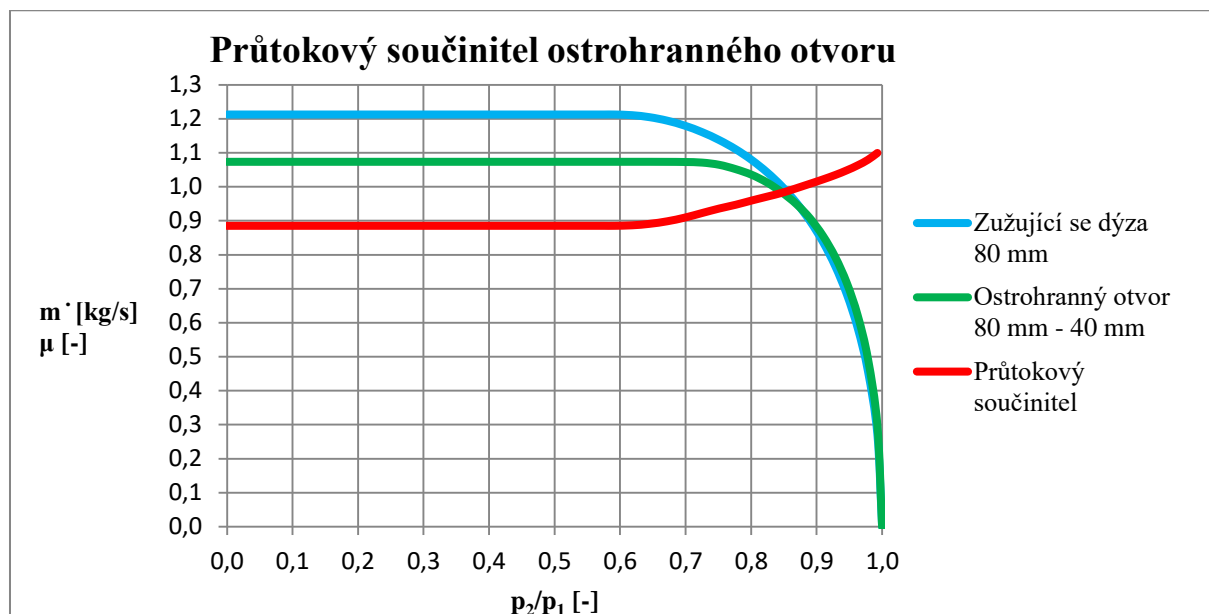
8321	93 004	60000	0,65	1,07352
8319	93 006	62500	0,67	1,07339
8312	93 013	65000	0,70	1,07298
8283	93 042	67500	0,73	1,07124
8175	93 150	70000	0,75	1,06471
7965	93 360	72500	0,78	1,05186
7699	93 626	75000	0,80	1,03523
7341	93 984	77500	0,82	1,01236
6902	94 423	80000	0,85	0,98337
6405	94 920	82500	0,87	0,94918
5823	95 502	85000	0,89	0,90705
5152	96 173	87500	0,91	0,85546
4401	96 924	90000	0,93	0,79290
3571	97 754	92500	0,95	0,71650
2662	98 663	95000	0,96	0,62074
1674	99 651	97500	0,98	0,49396
604	100 721	100000	0,99	0,29785
0	101 325	101325	1,00	0



Obr. 3.24: Porovnání průběhu hmotnostních průtoků v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro zužující se dýzu a pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 80 \text{ mm}$  a  $l = 40 \text{ mm}$



Nyní je možné provést vykreslení průtokového součinitele ostrohranného otvoru dle vztahu  $\mu = \frac{\dot{m}_o}{\dot{m}_d}$ .



Obr. 3.25: Vykreslení průběhu průtokového součinitele ostrohranného otvoru v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro rozměry kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu  $d = 80$  mm a  $l = 40$  mm

### Délka kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu 80 mm

$$\frac{d}{D} = \frac{80}{100} = 0,8$$

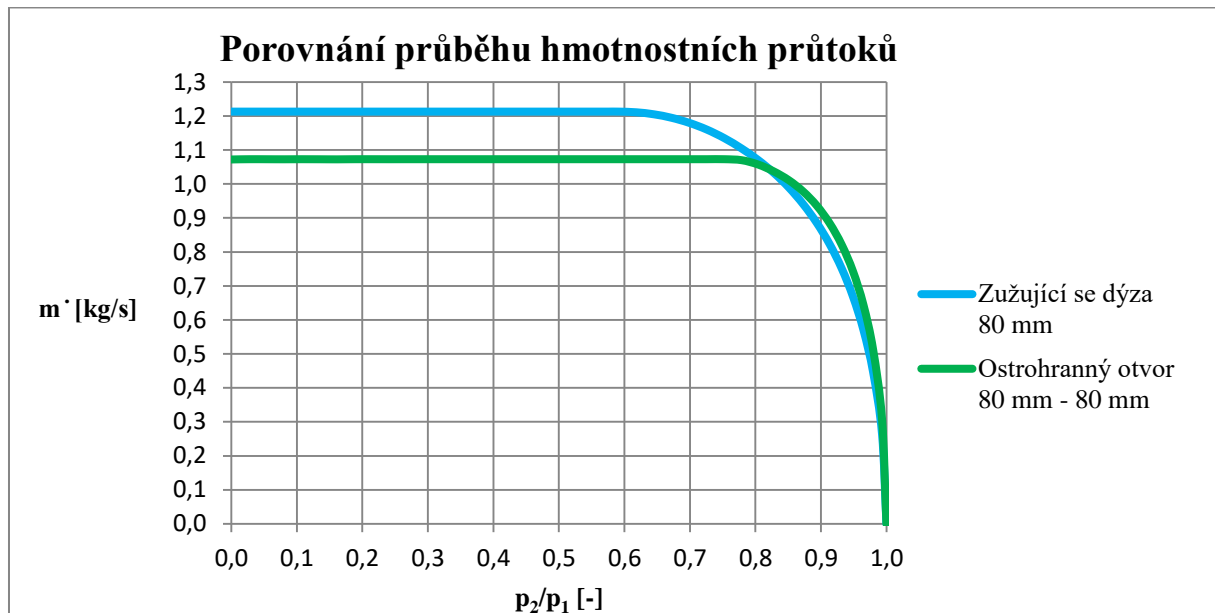
$$\frac{l}{d} = \frac{80}{80} = 1$$

Tab. 3.15: Vyčíslení hmotnostních průtoků v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 80$  mm a  $l = 80$  mm

Vstupní dynamický tlak $p_{d1}$ [Pa]	Vstupní statický tlak $p_1$ [Pa]	Výstupní statický tlak $p_2$ [Pa]	Tlakový poměr $\frac{p_2}{p_1}$ [-]	Hmotnostní průtok $\dot{m}$ $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$
8310	93 015	0	0	1,07210
8310	93 015	2500	0,03	1,07287
8310	93 015	5000	0,05	1,07277
8310	93 015	7500	0,08	1,07264
8310	93 015	10000	0,11	1,07285
8310	93 015	12500	0,13	1,07266
8310	93 015	15000	0,16	1,07248

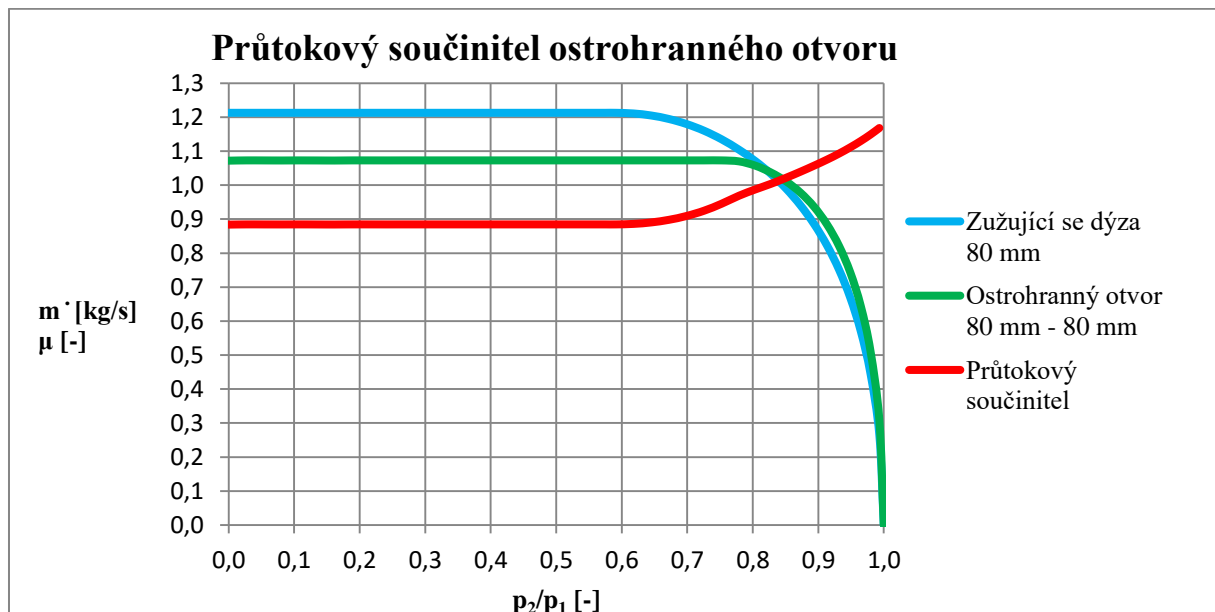
8310	93 015	17500	0,19	1,07287
8310	93 015	20000	0,22	1,07287
8310	93 015	22500	0,24	1,07277
8310	93 015	25000	0,27	1,07287
8310	93 015	27500	0,30	1,07286
8310	93 015	30000	0,32	1,07287
8310	93 015	32500	0,35	1,07287
8310	93 015	35000	0,38	1,07287
8310	93 015	37500	0,40	1,07287
8310	93 015	40000	0,43	1,07288
8310	93 015	42500	0,46	1,07287
8310	93 015	45000	0,48	1,07288
8310	93 015	47500	0,51	1,07287
8310	93 015	50000	0,54	1,07287
8310	93 015	52500	0,56	1,07287
8310	93 015	53528,15	0,58	1,07287
8310	93 015	55000	0,59	1,07287
8310	93 015	57500	0,62	1,07287
8310	93 015	60000	0,65	1,07287
8310	93 015	62500	0,67	1,07287
8310	93 015	65000	0,70	1,07287
8310	93 015	67500	0,73	1,07287
8310	93 015	70000	0,75	1,07287
8262	93 063	72500	0,78	1,06993
8053	93 272	75000	0,80	1,05723
7726	93 599	77500	0,83	1,03696
7321	94 005	80000	0,85	1,01102
6819	94 506	82500	0,87	0,97776
6221	95 104	85000	0,89	0,93608
5523	95 802	87500	0,91	0,88443
4732	96 593	90000	0,93	0,82116
3848	97 477	92500	0,95	0,74301
2871	98 454	95000	0,96	0,64419
1804	99 521	97500	0,98	0,51258

648	100 677	100000	0,99	0,30844
0	101 325	101325	1,00	0



Obr. 3.26: Porovnání průběhu hmotnostních průtoků v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro zužující se dýzu a pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 80$  mm a  $l = 80$  mm

Nyní je možné provést vykreslení průtokového součinitele ostrohranného otvoru dle vztahu  $\mu = \frac{\dot{m}_o}{\dot{m}_d}$ .



Obr. 3.27: Vykreslení průběhu průtokového součinitele ostrohranného otvoru v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro rozměry kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu  $d = 80$  mm a  $l = 80$  mm

### Délka kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu 120 mm

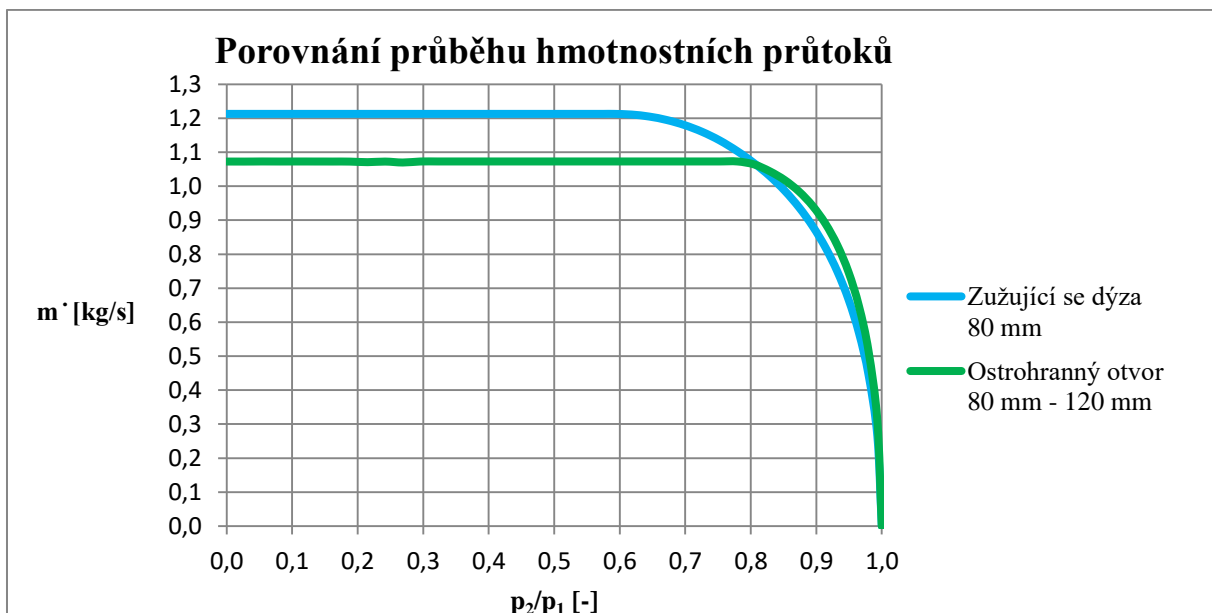
$$\frac{d}{D} = \frac{80}{100} = 0,8$$

$$\frac{l}{d} = \frac{120}{80} = 1,5$$

Tab. 3.16: Vyčíslení hmotnostních průtoků v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 80$  mm a  $l = 120$  mm

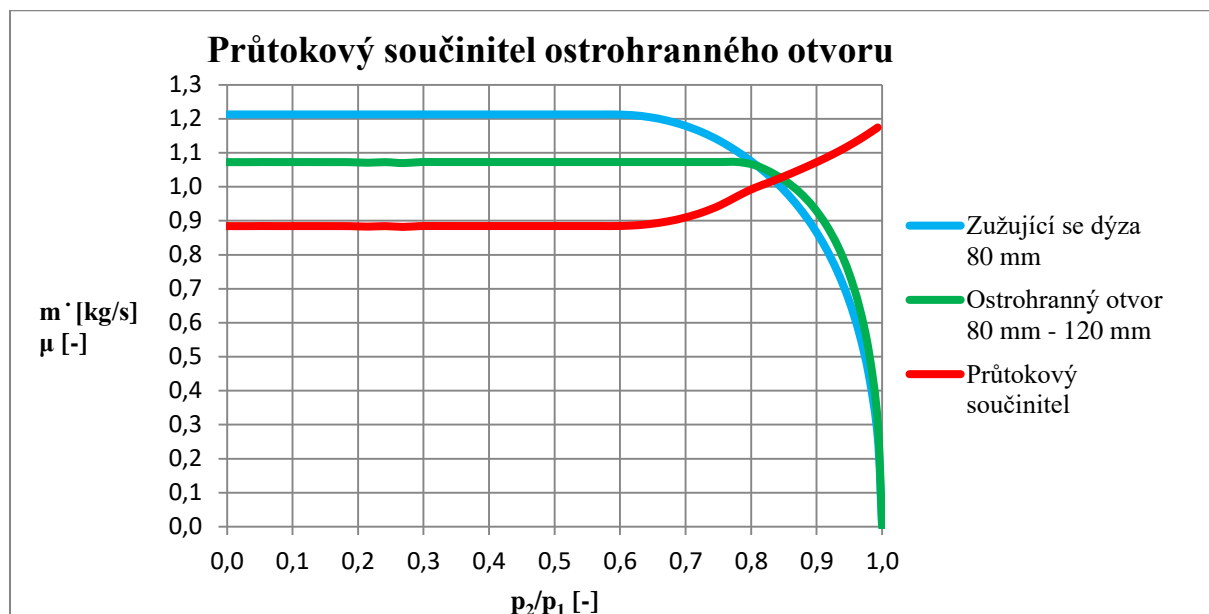
Vstupní dynamický tlak $p_{d1}$ [Pa]	Vstupní statický tlak $p_1$ [Pa]	Výstupní statický tlak $p_2$ [Pa]	Tlakový poměr $\frac{p_2}{p_1}$ [-]	Hmotnostní průtok $\dot{m}$ $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$
8310	93 015	0	0,00	1,07263
8310	93 015	2500	0,03	1,07254
8310	93 015	5000	0,05	1,07283
8310	93 015	7500	0,08	1,07268
8310	93 015	10000	0,11	1,07277
8310	93 015	12500	0,13	1,07273
8310	93 015	15000	0,16	1,07265
8310	93 015	17500	0,19	1,07244
8310	93 015	20000	0,22	1,07081
8310	93 015	22500	0,24	1,07257
8310	93 015	25000	0,27	1,06982
8310	93 015	27500	0,30	1,07275
8310	93 015	30000	0,32	1,07287
8310	93 015	32500	0,35	1,07287
8310	93 015	35000	0,38	1,07287
8310	93 015	37500	0,40	1,07287
8310	93 015	40000	0,43	1,07287
8310	93 015	42500	0,46	1,07287
8310	93 015	45000	0,48	1,07288
8310	93 015	47500	0,51	1,07288
8310	93 015	50000	0,54	1,07287
8310	93 015	52500	0,56	1,07287
8310	93 015	53528,15	0,58	1,07287
8310	93 015	55000	0,59	1,07287
8310	93 015	57500	0,62	1,07287

8310	93 015	60000	0,65	1,07287
8310	93 015	62500	0,67	1,07287
8310	93 015	65000	0,70	1,07287
8310	93 015	67500	0,73	1,07287
8310	93 015	70000	0,75	1,07287
8310	93 015	72500	0,78	1,07287
8166	93 159	75000	0,81	1,06414
7839	93 486	77500	0,83	1,04402
7427	93 898	80000	0,85	1,01789
6915	94 410	82500	0,87	0,98421
6303	95 022	85000	0,89	0,94198
5594	95 731	87500	0,91	0,88983
4789	96 536	90000	0,93	0,82590
3890	97 435	92500	0,95	0,74694
2899	98 426	95000	0,97	0,64724
1819	99 506	97500	0,98	0,51467
652	100 673	100000	0,99	0,30939
0	101 325	101325	1,00	0



Obr. 3.28: Porovnání průběhu hmotnostních průtoků v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro zužující se dýzu a pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 80$  mm a  $l = 120$  mm

Nyní je možné provést vykreslení průtokového součinitele ostrohranného otvoru dle vztahu  $\mu = \frac{\dot{m}_o}{\dot{m}_d}$ .



Obr. 3.29: Vykreslení průběhu průtokového součinitele ostrohranného otvoru v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro rozměry kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu  $d = 80$  mm a  $l = 120$  mm

### Délka kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu 200 mm

$$\frac{d}{D} = \frac{80}{100} = 0,8$$

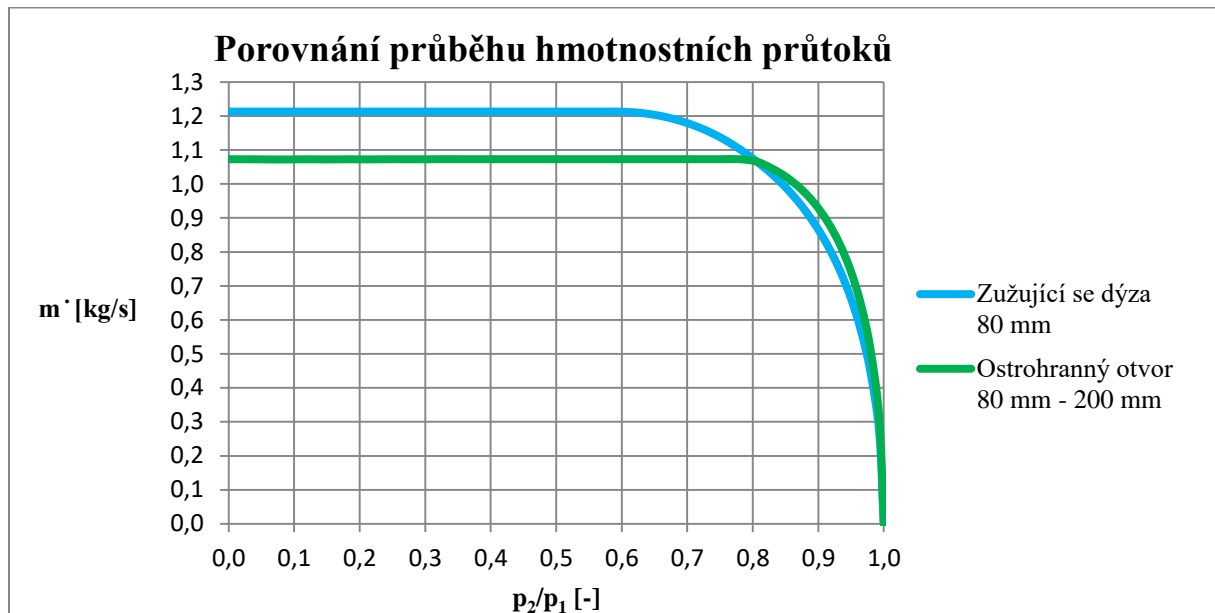
$$\frac{l}{d} = \frac{200}{80} = 2,5$$

Tab. 3.17: Vyčíslení hmotnostních průtoků v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 80$  mm a  $l = 200$  mm

Vstupní dynamický tlak $p_{d1}$ [Pa]	Vstupní statický tlak $p_1$ [Pa]	Výstupní statický tlak $p_2$ [Pa]	Tlakový poměr $\frac{p_2}{p_1}$ [-]	Hmotnostní průtok $\dot{m}$ $\left[\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right]$
8310	93 015	0	0,00	1,07281
8310	93 015	2500	0,03	1,07260
8310	93 015	5000	0,05	1,07232
8310	93 015	7500	0,08	1,07196
8310	93 015	10000	0,11	1,07251
8310	93 015	12500	0,13	1,07243
8310	93 015	15000	0,16	1,07227

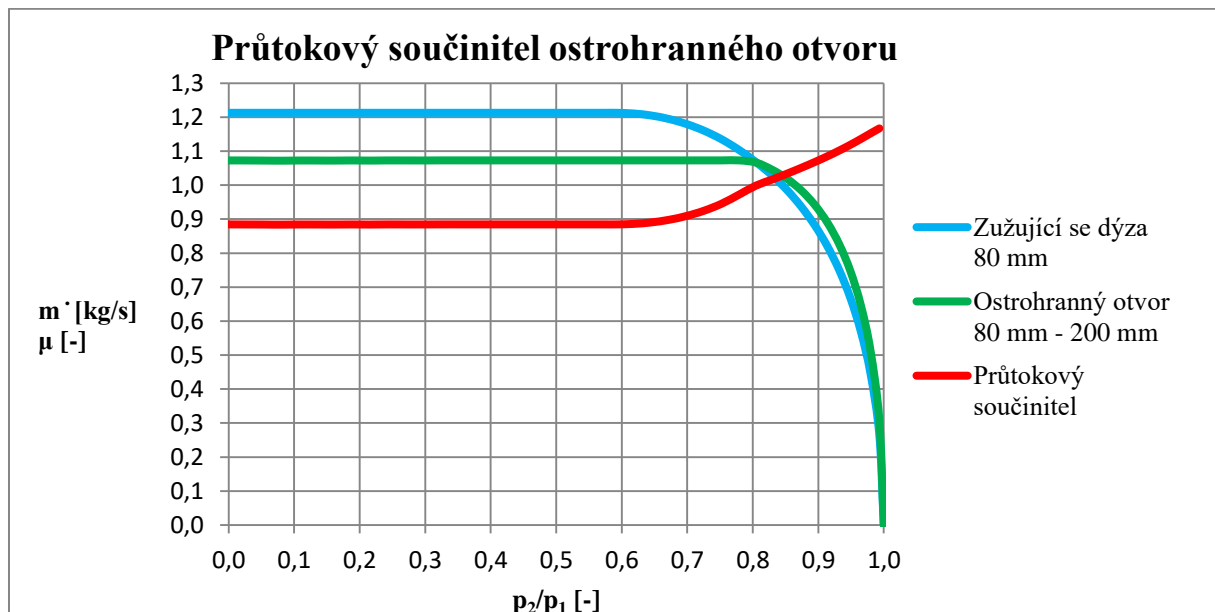
8310	93 015	17500	0,19	1,07268
8310	93 015	20000	0,22	1,07231
8310	93 015	22500	0,24	1,07278
8310	93 015	25000	0,27	1,07269
8310	93 015	27500	0,30	1,07262
8310	93 015	30000	0,32	1,07287
8310	93 015	32500	0,35	1,07287
8310	93 015	35000	0,38	1,07287
8310	93 015	37500	0,40	1,07287
8310	93 015	40000	0,43	1,07287
8310	93 015	42500	0,46	1,07287
8310	93 015	45000	0,48	1,07288
8310	93 015	47500	0,51	1,07287
8310	93 015	50000	0,54	1,07287
8310	93 015	52500	0,56	1,07287
8310	93 015	53528,15	0,58	1,07287
8310	93 015	55000	0,59	1,07287
8310	93 015	57500	0,62	1,07287
8310	93 015	60000	0,65	1,07287
8310	93 015	62500	0,67	1,07287
8310	93 015	65000	0,70	1,07287
8310	93 015	67500	0,73	1,07287
8310	93 015	70000	0,75	1,07287
8310	93 015	72500	0,78	1,07287
8200	93 125	75000	0,81	1,06620
7868	93 457	77500	0,83	1,04580
7445	93 880	80000	0,85	1,01908
6925	94 400	82500	0,87	0,98487
6306	95 019	85000	0,89	0,94216
5591	95 734	87500	0,91	0,88966
4783	96 542	90000	0,93	0,82540
3882	97 443	92500	0,95	0,74614
2890	98 435	95000	0,97	0,64620
1810	99 515	97500	0,98	0,51350

647	100 678	100000	0,99	0,30832
0	101 325	101325	1,00	0



Obr. 3.30: Porovnání průběhu hmotnostních průtoků v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro zužující se dýzu a pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 80$  mm a  $l = 200$  mm

Nyní je možné provést vykreslení průtokového součinitele ostrohranného otvoru dle vztahu  $\mu = \frac{\dot{m}_o}{\dot{m}_d}$ .



Obr. 3.31: Vykreslení průběhu průtokového součinitele ostrohranného otvoru v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro rozměry kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu  $d = 80$  mm a  $l = 200$  mm

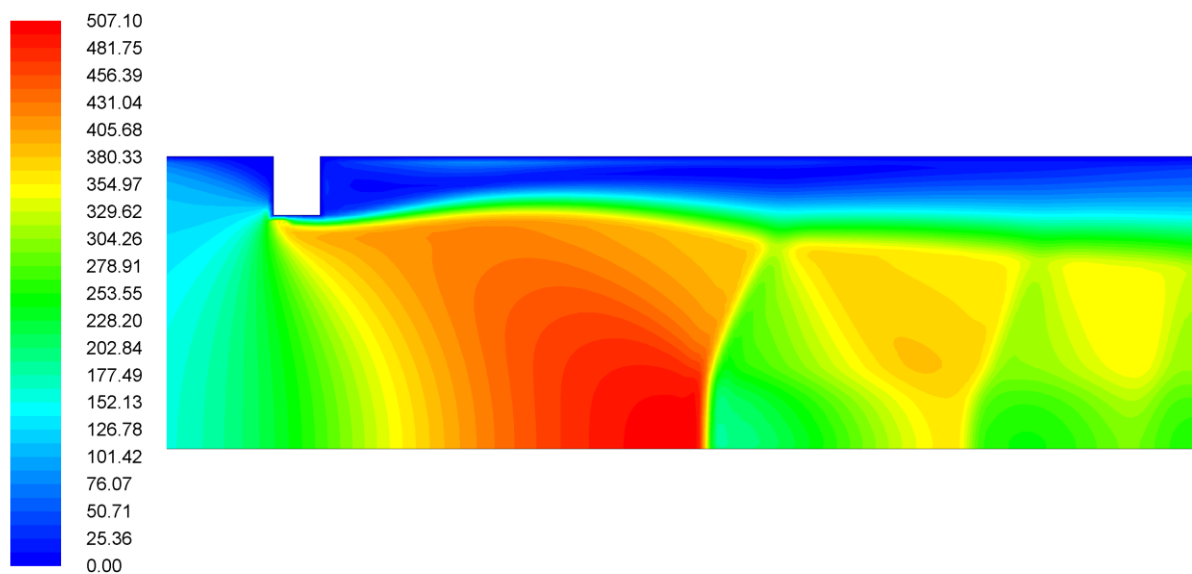


### Vyhodnocení průtočných charakteristik pro průměr ostrohranného otvoru 80 mm

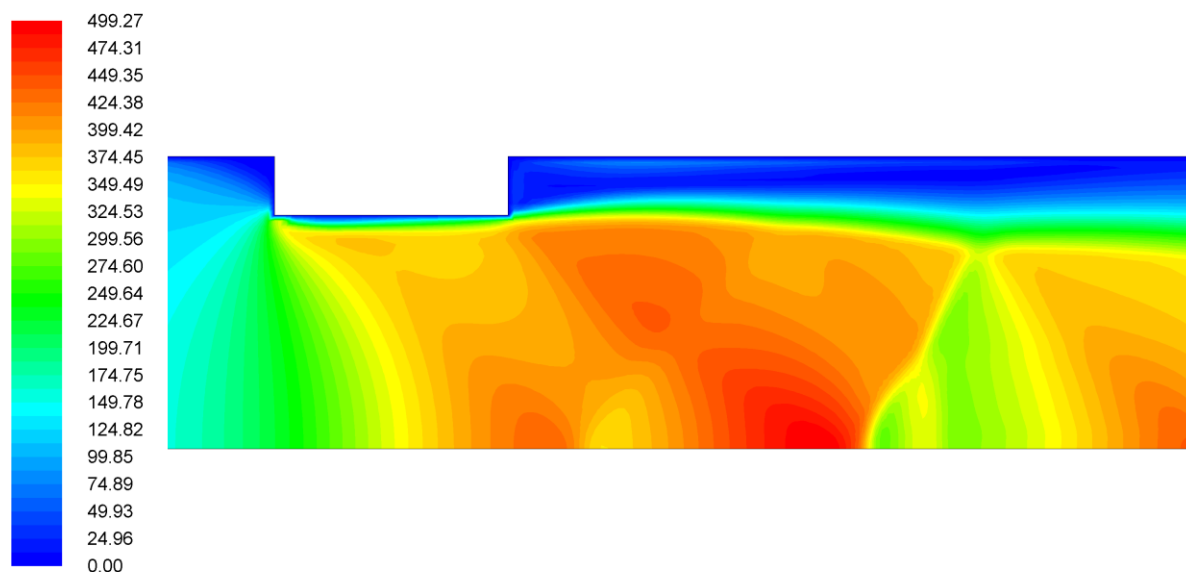
Pro délku kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu 8 mm je druhý kritický tlakový poměr ostrohranného otvoru větší než kritický tlakový poměr u dýzy. Z toho lze vyvodit následující závěr. Pokud se zvýší poměr  $\frac{d}{D}$ , zvýší se i hodnota druhého kritického tlakového poměru ostrohranného otvoru.

Při zvyšování délky kanálů se hranice druhého kritického tlakového poměru posouvá směrem k vyšším hodnotám. Tato vzrůstající tendence má podobný charakter jako u  $\frac{d}{D} = 0,5$ .

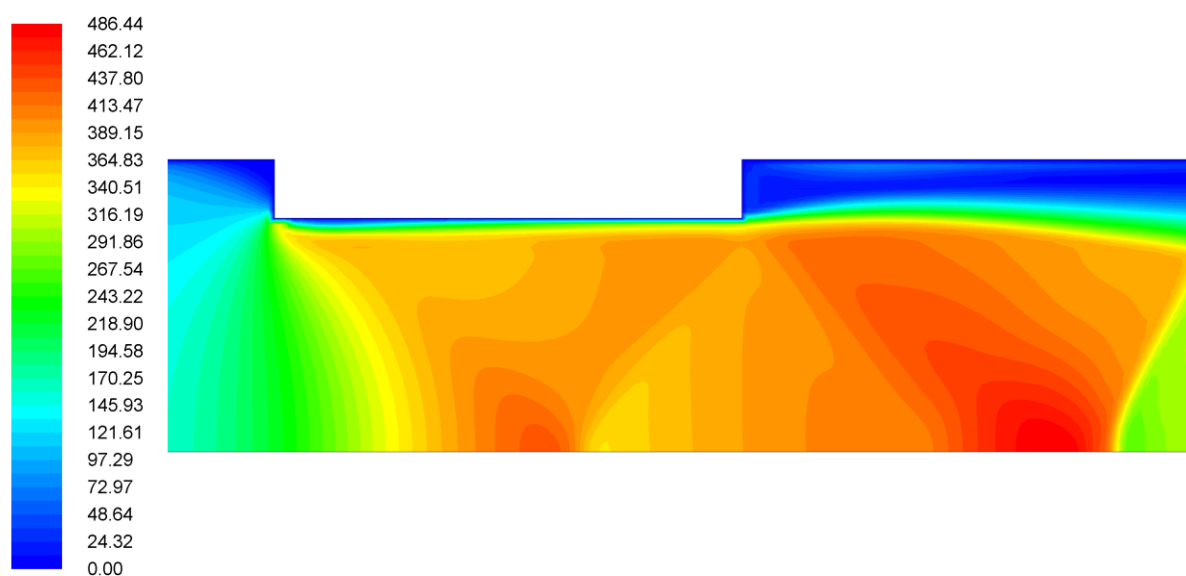
Sada níže uvedených obrázků je uvedena pro porovnání se sadou obrázků na konci podkapitoly 3.2.1. Na obrázcích lze spatřit, že zde dochází při zvětšování délek kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu ke snižování maximální dosažitelné rychlosti za předpokladu stejného tlakového poměru.



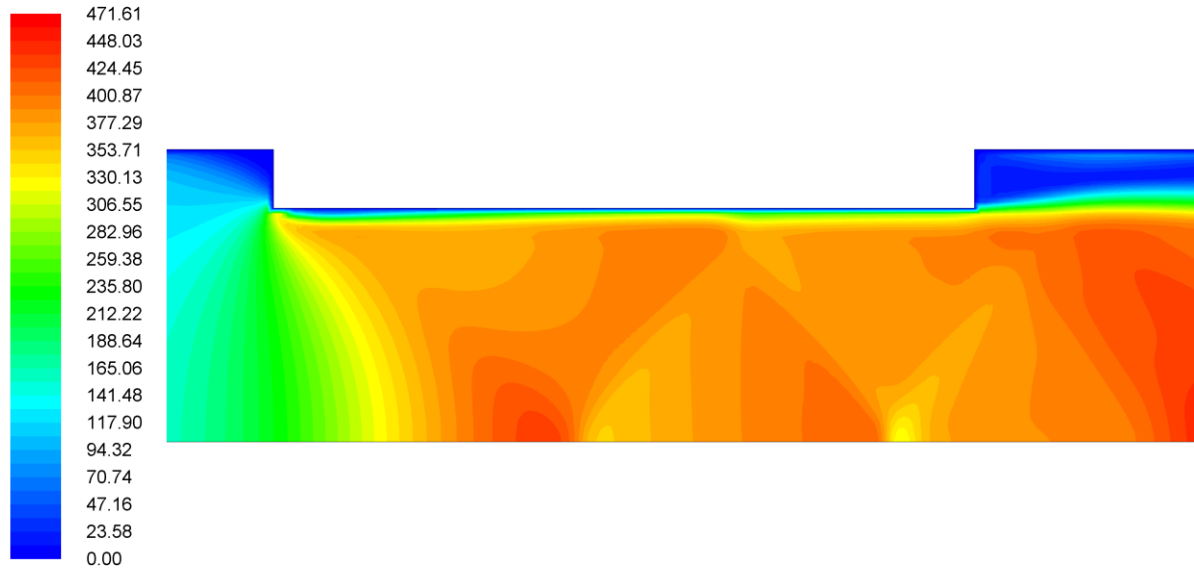
Obr. 3.32: Průběh rychlosti pro tlakový poměr 0,59 (kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 80$  mm a  $l = 8$  mm)



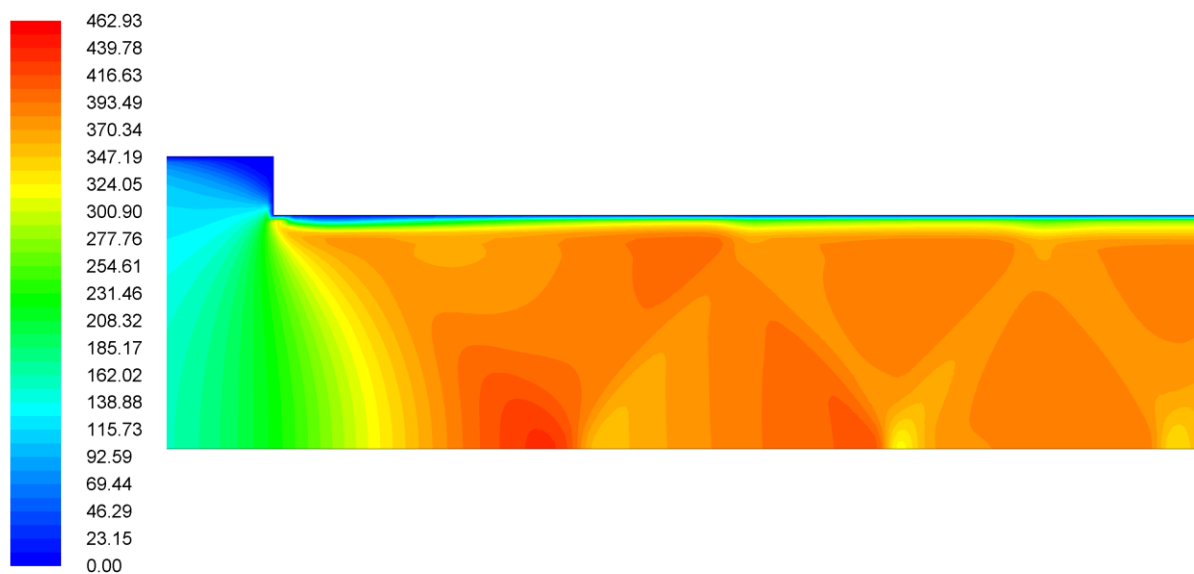
Obr. 3.33: Průběh rychlosti pro tlakový poměr 0,59 (kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 80$  mm a  $l = 40$  mm)



Obr. 3.34: Průběh rychlosti pro tlakový poměr 0,59 (kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 80$  mm a  $l = 80$  mm)



Obr. 3.35: Průběh rychlosti pro tlakový poměr 0,59 (kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 80$  mm a  $l = 120$  mm)



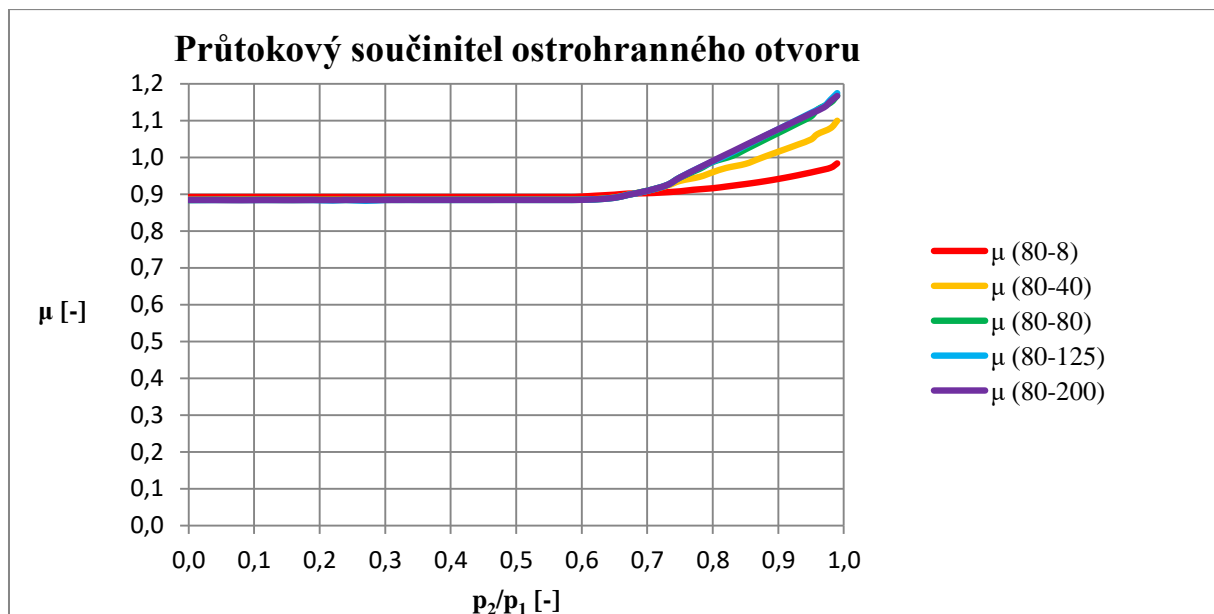
Obr. 3.36: Průběh rychlosti pro tlakový poměr 0,59 (kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 80$  mm a  $l = 200$  mm)

Vypočtená hodnota maximálního hmotnostního průtoku pro zužující se dýzu o průměru výstupního průřezu 80 mm je zhruba o  $0,75 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$  větší oproti zužující se dýze o průměru výstupního průřezu 50 mm. U ostrohranného otvoru o průměru 80 mm je patrné navýšení maximální hodnoty hmotnostního průtoku zhruba o  $0,7 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ .

Tab. 3.18: Vyčíslení průtokových součinitelů ostrohranného otvoru pro různé délky kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu o průměru  $d = 80$  mm v závislosti na měnícím se tlakovém poměru

$\frac{p_2}{p_1}$ [-]	$\mu_{80-8}$ [-]	$\frac{p_2}{p_1}$ [-]	$\mu_{80-40}$ [-]	$\frac{p_2}{p_1}$ [-]	$\mu_{80-80}$ [-]	$\frac{p_2}{p_1}$ [-]	$\mu_{80-120}$ [-]	$\frac{p_2}{p_1}$ [-]	$\mu_{80-200}$ [-]
0	0,89244	0	0,88521	0	0,88395	0	0,88438	0	0,88453
0,03	0,89244	0,03	0,88523	0,03	0,88458	0,03	0,88431	0,03	0,88436
0,05	0,89245	0,05	0,88521	0,05	0,88450	0,05	0,88455	0,05	0,88413
0,08	0,89247	0,08	0,88525	0,08	0,88439	0,08	0,88442	0,08	0,88383
0,11	0,89245	0,11	0,88525	0,11	0,88456	0,11	0,88450	0,11	0,88428
0,13	0,89245	0,13	0,88525	0,13	0,88441	0,13	0,88446	0,13	0,88422
0,16	0,89245	0,16	0,88525	0,16	0,88426	0,16	0,88440	0,16	0,88409
0,19	0,89246	0,19	0,88525	0,19	0,88458	0,19	0,88423	0,19	0,88442
0,22	0,89247	0,22	0,88525	0,22	0,88458	0,22	0,88288	0,22	0,88412
0,24	0,89245	0,24	0,88525	0,24	0,88450	0,24	0,88433	0,24	0,88451
0,27	0,89247	0,27	0,88525	0,27	0,88458	0,27	0,88207	0,27	0,88443
0,30	0,89247	0,30	0,88525	0,30	0,88457	0,30	0,88448	0,30	0,88437
0,32	0,89246	0,32	0,88525	0,32	0,88458	0,32	0,88458	0,32	0,88458
0,35	0,89246	0,35	0,88525	0,35	0,88458	0,35	0,88458	0,35	0,88458
0,38	0,89246	0,38	0,88525	0,38	0,88458	0,38	0,88458	0,38	0,88458
0,40	0,89246	0,40	0,88525	0,40	0,88458	0,40	0,88458	0,40	0,88458
0,43	0,89246	0,43	0,88526	0,43	0,88459	0,43	0,88458	0,43	0,88458
0,46	0,89246	0,46	0,88527	0,46	0,88458	0,46	0,88458	0,46	0,88458
0,48	0,89246	0,48	0,88527	0,48	0,88459	0,48	0,88459	0,48	0,88459
0,51	0,89246	0,51	0,88525	0,51	0,88458	0,51	0,88459	0,51	0,88458
0,54	0,89246	0,54	0,88526	0,54	0,88458	0,54	0,88458	0,54	0,88458
0,57	0,89246	0,56	0,88527	0,56	0,88458	0,56	0,88458	0,56	0,88458
0,58	0,89246	0,58	0,88527	0,58	0,88458	0,58	0,88458	0,58	0,88458
0,59	0,89249	0,59	0,88528	0,59	0,88459	0,59	0,88459	0,59	0,88459
0,62	0,89583	0,62	0,88669	0,62	0,88601	0,62	0,88601	0,62	0,88601
0,65	0,89876	0,65	0,89103	0,65	0,89037	0,65	0,89037	0,65	0,89037
0,67	0,90161	0,67	0,89852	0,67	0,89798	0,67	0,89798	0,67	0,89798
0,70	0,90272	0,70	0,90937	0,70	0,90926	0,70	0,90926	0,70	0,90926
0,72	0,90443	0,73	0,92301	0,73	0,92480	0,73	0,92480	0,73	0,92480

0,75	0,90789	0,75	0,93612	0,75	0,94546	0,75	0,94546	0,75	0,94546
0,77	0,91200	0,78	0,94722	0,78	0,96895	0,78	0,97251	0,78	0,97251
0,80	0,91626	0,80	0,95971	0,80	0,98755	0,81	0,99644	0,81	0,99911
0,82	0,92072	0,82	0,97115	0,83	1,00409	0,83	1,01374	0,83	1,01620
0,84	0,92532	0,85	0,98236	0,85	1,02185	0,85	1,03189	0,85	1,03362
0,86	0,93006	0,87	0,99577	0,87	1,03966	0,87	1,04985	0,87	1,05090
0,88	0,93542	0,89	1,00905	0,89	1,05750	0,89	1,06762	0,89	1,06795
0,90	0,94145	0,91	1,02180	0,91	1,07502	0,91	1,08529	0,91	1,08493
0,92	0,94804	0,93	1,03481	0,93	1,09296	0,93	1,10309	0,93	1,10201
0,94	0,95530	0,95	1,04857	0,95	1,11133	0,95	1,12101	0,95	1,11908
0,96	0,96306	0,96	1,06327	0,96	1,12992	0,97	1,13899	0,97	1,13596
0,98	0,97192	0,98	1,07952	0,98	1,14886	0,98	1,15701	0,98	1,15230
0,99	0,98371	0,99	1,09956	0,99	1,16814	0,99	1,17454	0,99	1,16699



Obr. 3.37: Vykreslení průběhu průtokových součinitelů ostrohranného otvoru pro různé délky kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu o průměru  $d = 80$  mm v závislosti na měnícím se tlakovém poměru

Na Obr. 3.37 lze vidět vliv zvětšujícího se poměru  $\frac{l}{d}$  při zachování poměru  $\frac{d}{D} = 0,8$ . Pro tlakové poměry 0 až 0,6 jsou hodnoty průtokových součinitelů velmi podobné. Pro větší tlakové poměry vykazují průběhy průtokových součinitelů rostoucí charakter. Pro délky kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu 80 mm, 120 mm a 200 mm má průtokový součinitel ostrohranného otvoru naprosto shodující průběh. Tudíž lze říci, že pro  $\frac{d}{D} = 0,8$  a  $\frac{l}{d} \geq 1$  se již průběh průtokového součinitele ostrohranného otvoru nemění.

Průtokový součinitel ostrohranného otvoru pro délky kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu 40 mm, 80 mm, 120 mm a 200 mm pro vyšší tlakové poměry přesahuje hodnotu jedna. Danou skutečnost lze jen obtížně vysvětlit. Průtokový součinitel, který je vyšší než jedna se jeví jako fyzikální nesmysl a nasvědčuje, že v rámci dané studie se vyskytla chyba. Výše zmíněný výstup potvrdil důležitost validace neboli experimentálního ověření numerických výpočtů.

### 3.2.3 Celkové vyhodnocení průtočných charakteristik

Závěrem lze říci, že zvětšováním poměrů  $\frac{d}{D}$  a  $\frac{l}{d}$  se druhý kritický tlakový poměr ostrohranného otvoru výrazně posouvá směrem k vyšším hodnotám tlakových poměrů až do určité hranice.

Zvýšení hodnoty hmotnostního průtoku ostrohranným otvorem při zvětšení průměru daného ostrohranného otvoru je pochopitelné. Důležitějším poznatkem je zvýšení dané hodnoty hmotnostního průtoku ostrohranným otvorem při zvětšení délky kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu. Zvětšování délky kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu má smysl do doby dosažení druhého kritického tlakového poměru. Z daného důvodu je důležité se problematikou ostrohranných otvorů zabývat a experimentálně stanovit hodnoty druhých kritických tlakových poměrů pro různé poměry průměru ostrohranného otvoru k průměru potrubí.

### 3.3 Stanovení součinitele místní tlakové ztráty vybraného ostrohranného otvoru metodou CFD a jeho porovnání s hodnotou pomocí empirického výpočtu

Součinitele místní tlakové ztráty pro vybraný ostrohranný otvor je vhodné stanovit pomocí dynamického tlaku  $p_{d1}$  a trvalé tlakové ztráty  $\Delta p$ . Dané veličiny lze získat za pomoci metody CFD.

Dáno:

$$D = 0,1 \text{ m}$$

$$d = 0,05 \text{ m}$$

$$l = 0,125 \text{ m}$$

$$p_{c1} = 101325 \text{ Pa}$$

$$p_{s2} = 60000 \text{ Pa}$$

Stanoveno metodou CFD:

$$p_{d1} = 1069,786 \text{ Pa}$$

$$p_{c2} = 61794,794 \text{ Pa}$$

Výpočet:

$$\Delta p = p_{c1} - p_{c2} = 101325 - 61794,794 = 39530,206 \text{ Pa}$$

$$\Delta p = \zeta \cdot p_{d1}$$

$$\zeta = \frac{\Delta p}{p_{d1}} = \frac{39530,206}{1069,786} = 36,95$$

Tab. 3.19: Porovnání součinitele místní tlakové ztráty vybraného ostrohranného otvoru

Charakteristické rozměry	Tlakový poměr $\frac{p_2}{p_1}$ [-]	Součinitel místní tlakové ztráty $\zeta_{Ma}$ [-] dle empirického výpočtu	Součinitel místní tlakové ztráty $\zeta$ [-] dle metody CFD
$D = 0,1 \text{ m}$ $d = 0,05 \text{ m}$ $l = 0,125 \text{ m}$	0,59	20,83	36,95

Odchylka dosažených výsledků součinitele místní tlakové ztráty činí 43,6 %. Odchylka výsledků je nepřijatelná. V daném případě je nezbytné odchylku více rozebrat a přijít na možné příčiny vzniku. V rámci toho byly náhodně vybrány další ostrohranné otvory a další tlakové poměry pro stanovení součinitele místní tlakové ztráty za pomoci empirického výpočtu a za pomoci metody CFD. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 3.20.

Tab. 3.20: Porovnání součinitele místní tlakové ztráty ostrohranného otvoru pro další vybrané případy

Charakteristické rozměry	Tlakový poměr $\frac{p_2}{p_1}$ [-]	Součinitel místní tlakové ztráty $\zeta_{Ma}$ [-] dle empirického výpočtu	Součinitel místní tlakové ztráty $\zeta$ [-] dle metody CFD
$D = 0,1 \text{ m}$ $d = 0,05 \text{ m}$ $l = 0,075 \text{ m}$	0,59	21,68	36,95
$D = 0,1 \text{ m}$ $d = 0,05 \text{ m}$ $l = 0,05 \text{ m}$	0,59	23,81	37,24
$D = 0,1 \text{ m}$ $d = 0,05 \text{ m}$ $l = 0,025 \text{ m}$	0,59	34,01	39,01
$D = 0,1 \text{ m}$ $d = 0,05 \text{ m}$ $l = 0,005 \text{ m}$	0,59	36,76	41,34
$D = 0,1 \text{ m}$ $d = 0,05 \text{ m}$ $l = 0,125 \text{ m}$	0,2	20,83	70,99
$D = 0,1 \text{ m}$ $d = 0,05 \text{ m}$ $l = 0,125 \text{ m}$	0,3	20,83	63,32
$D = 0,1 \text{ m}$ $d = 0,05 \text{ m}$ $l = 0,125 \text{ m}$	0,49	20,83	45,97

$D = 0,1 \text{ m}$ $d = 0,05 \text{ m}$ $l = 0,125 \text{ m}$	0,69	20,83	29,06
$D = 0,1 \text{ m}$ $d = 0,05 \text{ m}$ $l = 0,125 \text{ m}$	0,89	20,08	20,15
$D = 0,1 \text{ m}$ $d = 0,05 \text{ m}$ $l = 0,125 \text{ m}$	0,94	18,5	18,57

Dle výše uvedených výsledků je zřejmý určitý rozpor mezi součiniteli místní tlakové ztráty, které jsou stanoveny dle empirického výpočtu. Pokud se mění  $\frac{l}{d}$  při zachování tlakového poměru, mění se i hodnota součinitele místní tlakové ztráty ostrohranného otvoru. Oproti tomu při zachování  $\frac{l}{d}$  a změně tlakového poměru jsou hodnoty součinitelů totožné až do určité hodnoty tlakového poměru. Výše uvedené upozorňuje na nedostatek použitého empirického výpočtu. Pokud nastane druhý kritický tlakový poměr ostrohranného otvoru a hmotnostní průtok se ustálí pro všechny nižší tlakové poměry, rychlost v místě před ostrohranným otvorem zůstává neměnná, jelikož se v daných případech mění tlakový poměr změnou tlaku na výstupu. Vstupní rychlost má vliv na Machovo číslo  $Ma_1$ , ke kterému je vztažena používaná korekce.

Při velkém  $\frac{l}{d}$  a vysokém tlakovém poměru nastává shoda výsledků stanovených dle empirického výpočtu a dle metody CFD. V takovém případě jsou odchylky rovny hodnotě 0,4 %.



## 4 Závěr

Bakalářská práce se věnuje zkoumání vlivu měnicí se geometrie ostrohranného otvoru na jeho průtočnou charakteristiku. Teoretická část uvádí základy proudění ideálního plynu dýzou a zabývá se stanovením a porovnáním průběhu hmotnostního průtoku dýzou a ostrohranným otvorem. Součástí teoretické části je i problematika místních tlakových ztrát. Tato problematika je zde popsána jen okrajově s ohledem na umožnění provedení empirického výpočtu součinitele místní tlakové ztráty pro jeden vybraný typ ostrohranného otvoru - délka kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu 125 mm a průměr ostrohranného otvoru 50 mm.

Praktická část uvádí vytvořený model pro výpočty metodou CFD. Model je vyhotoven pro potrubí o průměru 100 mm, ve kterém je umístěn kanál s ostrohranným otvorem na vstupu. Průměr a délka kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu byly parametrizovány a v průběhu vyhodnocování výsledků měněny. Průtočné charakteristiky byly vyhodnoceny pro délky kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu 5, 25, 50, 75 a 125 mm pro průměr ostrohranného otvoru 50 mm a 8, 40, 80, 120 a 200 mm pro průměr ostrohranného otvoru 80 mm. Souhrnně to znamená deset geometrických modifikací kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu. Pro každou danou geometrickou modifikaci byl stanoven hmotnostní průtok pro 44 různých tlakových poměrů.

V rámci analýzy a vyhodnocení výsledků metodou CFD je pro každou geometrickou modifikaci vyčíslen a vykreslen průběh hmotnostního průtoku v závislosti na měnicím se tlakovém poměru. Je vždy vykresleno porovnání průběhu hmotnostního průtoku dýzou a příslušným ostrohranným otvorem v závislosti na měnicím se tlakovém poměru. Dále je vykreslen průběh průtokového součinitele ostrohranného otvoru v závislosti na měnicím se tlakovém poměru. Na závěr je stanovena hodnota součinitele místní tlakové ztráty pro výše zmíněný vybraný typ ostrohranného otvoru metodou CFD a je porovnán s hodnotou stanovenou dle empirického výpočtu.

Výsledky dosažené metodou CFD bohužel nebylo možné validovat, avšak tato práce může sloužit jako podklad pro zhotovení experimentálního měření za účelem ověření průtočných charakteristik ostrohranných otvorů.

## Seznam použité literatury

- [1] BRABEC, P., BARTŮNĚK, F. *Proudění kapalin a plynů*.  
<https://sites.google.com/site/fyzika007/mechanika/proudeni-kapalin-a-plynua>
- [2] GAŠPAR, R. *Cvičení z termomechaniky*.  
<http://home.zcu.cz/~gaspar/Termomechanika.htm>
- [3] MAREŠ, R. *Kapitoly z termomechaniky*. Plzeň: ZČU, 2008. ISBN 978-80-7043-706-3
- [4] JEŽEK, J., VÁRADIOVÁ, B., ADAMEC, J. *Mechanika tekutin*. Praha: ČVUT, 2000.
- [5] DEJČ, M. E. *Technická dynamika plynů*. Praha: SNTL, 1967.
- [6] DOOSAN ŠKODA POWER. *Firemní dokumentace společnosti: DIN 1952 (r. 1943)*, str. 23
- [7] IDELCHIK, I. E. *Handbook od Hydraulic Resistance*. 4th ed., rev. and augmented. Redding: Begell House, 2007. ISBN 978-1-56700-251-5
- [8] HAVLÍK, A., PICEK, T., *Hydraulika potrubí*.  
[http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke\\_stazeni/prednasky/HY2V\\_04\\_Hydraulika\\_potrubi.pdf](http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HY2V/ke_stazeni/prednasky/HY2V_04_Hydraulika_potrubi.pdf)

## Seznam obrázků

Obr. 2.1: Závislost výtokové rychlosti ideálního plynu na tlakovém poměru [3]

Obr. 2.2: Závislost hmotnostního průtoku ideálního plynu na tlakovém poměru pro konstantní minimální průřez dýzy, ve kterém je kritická rychlost [3]

Obr. 2.3: Výtok proudu ostrohranným otvorem při různých tlakových poměrech [5]

Obr. 2.4: Tvary ostrohranných otvorů [5]

Obr. 2.5: Porovnání hmotnostního průtoku plynu v zužující se dýze a v ostrohranném otvoru při stejných výstupních průřezech [5]

Obr. 2.6: Ukázka výpočtu hmotnostního průtoku dýzou v Microsoft Excelu

Obr. 2.7: Kanál s ostrohranným otvorem na vstupu [7]

Obr. 3.1: Výpočetní síť s názvem SIT1

Obr. 3.2: Detail výpočetní sítě s názvem SIT1

Obr. 3.3: Diagram závislosti hmotnostního průtoku na počtu buněk výpočetní sítě

Obr. 3.4: Vykreslení vypočteného průběhu hmotnostního průtoku v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro zužující se dýzu o rozměru  $d = 50$  mm

Obr. 3.5: Porovnání průběhu hmotnostních průtoků v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro zužující se dýzu a pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 50$  mm a  $l = 5$  mm

Obr. 3.6: Vykreslení průběhu průtokového součinitele ostrohranného otvoru v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro rozměry kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu  $d = 50$  mm a  $l = 5$  mm

Obr. 3.7: Porovnání průběhu hmotnostních průtoků v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro zužující se dýzu a pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 50$  mm a  $l = 25$  mm

Obr. 3.8: Vykreslení průběhu průtokového součinitele ostrohranného otvoru v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro rozměry kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu  $d = 50$  mm a  $l = 25$  mm

Obr. 3.9: Porovnání průběhu hmotnostních průtoků v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro zužující se dýzu a pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 50$  mm a  $l = 50$  mm

Obr. 3.10: Vykreslení průběhu průtokového součinitele ostrohranného otvoru v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro rozměry kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu  $d = 50$  mm a  $l = 50$  mm

Obr. 3.11: Porovnání průběhu hmotnostních průtoků v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro zužující se dýzu a pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 50$  mm a  $l = 75$  mm

Obr. 3.12: Vykreslení průběhu průtokového součinitele ostrohranného otvoru v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro rozměry kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu  $d = 50$  mm a  $l = 75$  mm

Obr. 3.13: Porovnání průběhu hmotnostních průtoků v závislosti na měnicím se tlakovém poměru pro zužující se dýzu a pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 50 \text{ mm}$  a  $l = 125 \text{ mm}$

Obr. 3.14: Vykreslení průběhu průtokového součinitele ostrohranného otvoru v závislosti na měnicím se tlakovém poměru pro rozměry kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu  $d = 50 \text{ mm}$  a  $l = 125 \text{ mm}$

Obr. 3.15: Průběh rychlosti pro tlakový poměr 0,59 (kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 50 \text{ mm}$  a  $l = 5 \text{ mm}$ )

Obr. 3.16: Průběh rychlosti pro tlakový poměr 0,59 (kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 50 \text{ mm}$  a  $l = 25 \text{ mm}$ )

Obr. 3.17: Průběh rychlosti pro tlakový poměr 0,59 (kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 50 \text{ mm}$  a  $l = 50 \text{ mm}$ )

Obr. 3.18: Průběh rychlosti pro tlakový poměr 0,59 (kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 50 \text{ mm}$  a  $l = 75 \text{ mm}$ )

Obr. 3.19: Průběh rychlosti pro tlakový poměr 0,59 (kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 50 \text{ mm}$  a  $l = 125 \text{ mm}$ )

Obr. 3.20: Vykreslení průběhu průtokových součinitelů ostrohranného otvoru pro různé délky kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu o průměru  $d = 50 \text{ mm}$  v závislosti na měnicím se tlakovém poměru

Obr. 3.21: Vykreslení vypočteného průběhu hmotnostního průtoku v závislosti na měnicím se tlakovém poměru pro zužující se dýzu o rozměru  $d = 80 \text{ mm}$

Obr. 3.22: Porovnání průběhu hmotnostních průtoků v závislosti na měnicím se tlakovém poměru pro zužující se dýzu a pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 80 \text{ mm}$  a  $l = 8 \text{ mm}$

Obr. 3.23: Vykreslení průběhu průtokového součinitele ostrohranného otvoru v závislosti na měnicím se tlakovém poměru pro rozměry kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu  $d = 80 \text{ mm}$  a  $l = 8 \text{ mm}$

Obr. 3.24: Porovnání průběhu hmotnostních průtoků v závislosti na měnicím se tlakovém poměru pro zužující se dýzu a pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 80 \text{ mm}$  a  $l = 40 \text{ mm}$

Obr. 3.25: Vykreslení průběhu průtokového součinitele ostrohranného otvoru v závislosti na měnicím se tlakovém poměru pro rozměry kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu  $d = 80 \text{ mm}$  a  $l = 40 \text{ mm}$

Obr. 3.26: Porovnání průběhu hmotnostních průtoků v závislosti na měnicím se tlakovém poměru pro zužující se dýzu a pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 80 \text{ mm}$  a  $l = 80 \text{ mm}$

Obr. 3.27: Vykreslení průběhu průtokového součinitele ostrohranného otvoru v závislosti na měnicím se tlakovém poměru pro rozměry kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu  $d = 80 \text{ mm}$  a  $l = 80 \text{ mm}$

Obr. 3.28: Porovnání průběhu hmotnostních průtoků v závislosti na měnicím se tlakovém poměru pro zužující se dýzu a pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 80 \text{ mm}$  a  $l = 120 \text{ mm}$

Obr. 3.29: Vykreslení průběhu průtokového součinitele ostrohranného otvoru v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro rozměry kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu  $d = 80$  mm a  $l = 120$  mm

Obr. 3.30: Porovnání průběhu hmotnostních průtoků v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro zužující se dýzu a pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 80$  mm a  $l = 200$  mm

Obr. 3.31: Vykreslení průběhu průtokového součinitele ostrohranného otvoru v závislosti na měnícím se tlakovém poměru pro rozměry kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu  $d = 80$  mm a  $l = 200$  mm

Obr. 3.32: Průběh rychlosti pro tlakový poměr 0,59 (kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 80$  mm a  $l = 8$  mm)

Obr. 3.33: Průběh rychlosti pro tlakový poměr 0,59 (kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 80$  mm a  $l = 40$  mm)

Obr. 3.34: Průběh rychlosti pro tlakový poměr 0,59 (kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 80$  mm a  $l = 80$  mm)

Obr. 3.35: Průběh rychlosti pro tlakový poměr 0,59 (kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 80$  mm a  $l = 120$  mm)

Obr. 3.36: Průběh rychlosti pro tlakový poměr 0,59 (kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 80$  mm a  $l = 200$  mm)

Obr. 3.37: Vykreslení průběhu průtokových součinitelů ostrohranného otvoru pro různé délky kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu o průměru  $d = 80$  mm v závislosti na měnícím se tlakovém poměru

## Seznam tabulek

Tab. 2.1: Hodnoty průtokového součinitele ostrohranného otvoru pro vzduch [5]

Tab. 2.2: Hodnoty druhého kritického tlakového poměru a průtokového součinitele pro různé tvary ostrohranných otvorů pro vzduch [5]

Tab. 2.3: Hodnota korekce  $k_{Ma}$  pro různé poměry průřezu ostrohranného otvoru k průřezu potrubí v závislosti na Machově čísle [7]

Tab. 3.1: Parametry navržené geometrie

Tab. 3.2: Zhodnocení hmotnostního průtoku pro různé výpočetní sítě

Tab. 3.3: Parametry použité výpočetní sítě s názvem SIT2

Tab. 3.4: Hlavní parametry výpočtu

Tab. 3.5: Definování měnicí se geometrie pro průměr ostrohranného otvoru 50 mm

Tab. 3.6: Definování měnicí se geometrie pro průměr ostrohranného otvoru 80 mm

Tab. 3.7: Vyčíslení hmotnostních průtoků v závislosti na měnicím se tlakovém poměru pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 50$  mm a  $l = 5$  mm

Tab. 3.8: Vyčíslení hmotnostních průtoků v závislosti na měnicím se tlakovém poměru pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 50$  mm a  $l = 25$  mm

Tab. 3.9: Vyčíslení hmotnostních průtoků v závislosti na měnicím se tlakovém poměru pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 50$  mm a  $l = 50$  mm

Tab. 3.10: Vyčíslení hmotnostních průtoků v závislosti na měnicím se tlakovém poměru pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 50$  mm a  $l = 75$  mm

Tab. 3.11: Vyčíslení hmotnostních průtoků v závislosti na měnicím se tlakovém poměru pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 50$  mm a  $l = 125$  mm

Tab. 3.12: Vyčíslení průtokových součinitelů ostrohranného otvoru pro různé délky kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu o průměru  $d = 50$  mm v závislosti na měnicím se tlakovém poměru

Tab. 3.13: Vyčíslení hmotnostních průtoků v závislosti na měnicím se tlakovém poměru pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 80$  mm a  $l = 8$  mm

Tab. 3.14: Vyčíslení hmotnostních průtoků v závislosti na měnicím se tlakovém poměru pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 80$  mm a  $l = 40$  mm

Tab. 3.15: Vyčíslení hmotnostních průtoků v závislosti na měnicím se tlakovém poměru pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 80$  mm a  $l = 80$  mm

Tab. 3.16: Vyčíslení hmotnostních průtoků v závislosti na měnicím se tlakovém poměru pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 80$  mm a  $l = 120$  mm

Tab. 3.17: Vyčíslení hmotnostních průtoků v závislosti na měnicím se tlakovém poměru pro kanál s ostrohranným otvorem na vstupu o rozměrech  $d = 80$  mm a  $l = 200$  mm

Tab. 3.18: Vyčíslení průtokových součinitelů ostrohranného otvoru pro různé délky kanálu s ostrohranným otvorem na vstupu o průměru  $d = 80$  mm v závislosti na měnicím se tlakovém poměru

Tab. 3.19: Porovnání součinitele místní tlakové ztráty vybraného ostrohranného otvoru

Tab. 3.20: Porovnání součinitele místní tlakové ztráty ostrohranného otvoru pro další vybrané případy

## **Seznam příloh**

Příloha č. 1: Průtok normální clonou [6]



## **PŘÍLOHA č. 1**

### **Průtok normální clonou**

