



## **Bakalářská práce**

# **Vyhodnocení hmotnostního toku tryskou kombinovaného tvaru**

*Studijní program:*

B0715A270008 Strojírenství

*Autor práce:*

**André Křižanec**

*Vedoucí práce:*

Ing. Jan Kracík, Ph.D.

Katedra energetických zařízení

Liberec 2024



## Zadání bakalářské práce

# Vyhodnocení hmotnostního toku tryskou kombinovaného tvaru

*Jméno a příjmení:*

**André Křižanec**

*Osobní číslo:*

S20000056

*Studijní program:*

B0715A270008 Strojírenství

*Zadávající katedra:*

Katedra energetických zařízení

*Akademický rok:*

2022/2023

### Zásady pro vypracování:

Cílem práce je experimentální činnost v nových prostorách laboratoře KEZ. Student se podrobněji seznámí s metodami měření průtoku vzduchu a pro vybranou úlohu připraví a osobně provede měření. Součástí práce je zpracování a vyhodnocení naměřených dat, jejich diskuse a porovnání s teoretickým či numerickým výpočtem.

<i>Rozsah grafických prací:</i>	20
<i>Rozsah pracovní zprávy:</i>	40
<i>Forma zpracování práce:</i>	tištěná/elektronická
<i>Jazyk práce:</i>	čeština

### **Seznam odborné literatury:**

- [1] A.H. Shapiro, The Dynamics and thermodynamics of compressible fluid flow / by Ascher H. Shapiro, New York. II (1954) 672.
- [2] J. Noskievič and kol., Mechanika tekutin. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1987.
- [3] ČSN EN ISO 5167-1, Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu – Část 1: Obecné principy a požadavky. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [4] ČSN EN ISO 5167-2, Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu – Část 2: Clony. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [5] ČSN EN ISO 5167-3, Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu – Část 3: Dýzy a Venturiho dýzy. Praha: Český normalizační institut, 2003.

*Vedoucí práce:* Ing. Jan Kracík, Ph.D.  
Katedra energetických zařízení

*Datum zadání práce:* 1. listopadu 2022  
*Předpokládaný termín odevzdání:* 30. dubna 2024

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
děkan

L.S.

doc. Ing. Petra Dančová, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2022

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

# Vyhodnocení hmotnostního toku tryskou kombinovaného tvaru

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se věnuje vyhodnocení hmotnostního toku tryskou kombinovaného tvaru Fliegnerovým vztahem, Coriolisovým průtokoměrem a normou ISO 5167-1 a 5167-2. V teoretické části je práce zaměřena na popis problematiky proudění plynů a způsoby vyhodnocení průtoku. Praktická část pak pojednává o měření hmotnostního toku v laboratoři KEZ, jejím vyhodnocení a porovnání s analytickým modelem a s výsledky z Coriolisova průtokoměru.

## Klíčová slova

tryska kombinovaného tvaru, analytický model, vyhodnocení hmotnostního toku

# Evaluation of mass flow rate through convergent-divergent nozzle

## Abstract

This bachelor's thesis is devoted to the evaluation of mass flow through a convergent-divergent nozzle using the Fliegner relation, Coriolis flow meter, and a norm ISO 5167-1 and 5167-2. In the theoretical part, the work is focused on the description of the issue of gas flow and methods of flow evaluation. The practical part then discusses mass flow measurement in the KEZ laboratory, its evaluation and comparison to the analytical model, and the results from the Coriolis flow meter.

## Keywords

convergent-divergent nozzle, analytical model, mass flow evaluation

## Poděkování

Touto cestou bych rád upřímně poděkoval Ing. Janu Kracíkovi, Ph.D. za odborné rady, motivaci a také za vstřícný přístup. Rád bych poděkoval zaměstnancům Katedry energetických zařízení za pomoc s realizací měřicí sestavy a vypůjčení potřebných měřidel. Tímto také děkuji rodině a přátelům za podporu při studiu.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Teorie proudění</b>	<b>12</b>
2.1	Úvodní vztahy pro ideální plyn	12
2.2	Rovnice kontinuity	13
2.3	Pohybová rovnice	13
2.4	I. TD zákon	13
2.5	Stlačitelnost	13
2.6	Stlačitelné/nestlačitelné proudění	14
2.7	Tlak a jeho definice	14
<b>3</b>	<b>Izoentropické proudění ideálního plynu</b>	<b>14</b>
3.1	Energetická rovnice	15
3.2	Rovnice pro kontrolní objem	15
3.3	Rychlost při izoentropické expanzi	15
3.4	Nadzvukové/podzvukové proudění	15
<b>4</b>	<b>Proudění v tryskách</b>	<b>16</b>
4.1	Režimy trysky	16
4.1.1	Dynamické funkce	17
4.2	Rázové vlny	18
<b>5</b>	<b>Metody vyhodnocení průtoku</b>	<b>19</b>
5.1	Průtokoměry	19
5.1.1	Bezdotykový ultrazvukový průtokoměr	19
5.1.2	Plovákové průtokoměry	20
5.1.3	Vírové průtokoměry	21
5.1.4	Coriolisův průtokoměr	21
5.2	ISO 5167-1 a ISO 5167-2	23
5.2.1	Princip metody měření	23
5.2.2	Metoda určení poměru průměrů zvoleného prvku	24
5.2.3	Výpočet průtoku	24
5.2.4	Určení hustoty proudící tekutiny	24
5.2.5	Podmínky proudění	24
5.3	Vyhodnocení průtoku výpočtem	24
<b>6</b>	<b>Praktická část</b>	<b>25</b>
6.1	Měřicí soustava	27
6.1.1	Primární prvek	28



6.1.2	Měřicí potrubí.....	30
6.2	Měřicí přístroje .....	30
6.2.1	Měření atmosférických podmínek.....	30
6.2.2	Měření tlaku P0 .....	31
6.2.3	Měření tlaku P1 .....	31
6.2.4	Měření tlakové difference $\Delta P$ .....	31
6.2.5	Měření průtoku .....	32
6.3	Analytický model.....	33
6.4	Měření a vyhodnocení průtoku normami ISO 5167-1 a 5167-2.....	34
6.5	Měření.....	34
6.5.1	První měření (14. 06. 2023) – tryska v režimu s rázovou vlnou .....	35
6.5.2	Druhé měření (27.06.2023) – tryska v režimu s rázovou vlnou.....	35
6.5.3	Výpočet hmotnostního toku z naměřených hodnot.....	36
6.5.4	Nejistoty .....	38
<b>7</b>	<b>Diskuse výsledků .....</b>	<b>40</b>
<b>8</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>45</b>
	<b>Použitá literatura.....</b>	<b>46</b>
	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>48</b>

## Seznam zkratk, symbolů a použitých veličin

$t$	čas	[s]
$\mu$	dynamická viskozita	[kg·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
H	entalpie	[J]
S	entropie	[J·K <sup>-1</sup> ]
m	hmotnost	[kg]
$\dot{m}$	hmotnostní tok	[kg·s <sup>-1</sup> ]
$\dot{m}_{\text{před}}$	hmotnostní tok před rázovou vlnou	[kg·s <sup>-1</sup> ]
$\dot{m}_{\text{za}}$	hmotnostní tok za rázovou vlnou	[kg·s <sup>-1</sup> ]
$\rho$	hustota	[kg·m <sup>-3</sup> ]
ISO	international standard organisation	
$c_p$	izobarická měrná tepelná kapacita	[J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$c_v$	izochorická měrná tepelná kapacita	[J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$\lambda$	Lavalovo číslo	[1]
M	Machovo číslo	[1]
r	měrná plynová konstanta	[J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$M_m$	molární hmotnost	[kg·kmol <sup>-1</sup> ]
R	molární univerzální plynová konstanta	[J·kmol <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
V	objem	[m <sup>3</sup> ]
W	objemová práce	[J]
W	objemová práce	[J]
A	plocha	[m <sup>2</sup> ]
$\kappa$	Poissonova konstanta	[1]
$\psi$	průtokový součinitel	[1]
v	rychlost	[m·s <sup>-1</sup> ]
a	rychlost zvuku	[m·s <sup>-1</sup> ]
Q	teplo	[J]
T	teplota	[K]
p	tlak	[Pa]
U	vnitřní energie	[J]

# 1 Úvod

Tato práce se zabývá vyhodnocením hmotnostního toku v trysce kombinovaného tvaru (Lavalově trysce). Cílem práce je měření hmotnostního toku v laboratoři KEZ, vyhodnocení a porovnání výsledků s teoretickým modelem.

Lavalova tryska má široké spektrum využití, například v oblasti aditivních technologií pro urychlování částic kovového prášku, nebo ji lze využít pro technologie dělení materiálu. Tryska nachází uplatnění také v proudových motorech, kde za spalovací komorou dochází k expanzi a urychlování spalin na nadzvukové rychlosti.

První část bakalářské práce se zabývá způsoby, jimiž lze vyhodnotit průtok různými druhy nejčastěji využívaných průtokoměrů a normami ISO 5167-1 a 5167-2. Dále jsou v první části popsány základní vztahy pro proudění, a také je zde popsáno chování proudu plynu v Lavalově trysce při různých režimech proudění.

Druhá část práce pojednává o problematice sestavy měřicího potrubí a použitých snímačích tlaku. Dále je pozornost věnována procesu vyhodnocování hmotnostního toku dle normy ISO 5167-1 a 5167-2, včetně vyhodnocení nejistot měření, Coriolisovým průtokoměrem a za pomoci Fliegnerova vztahu v trysce s konkrétní geometrií. V závěru jsou porovnány všechny metody vyhodnocení hmotnostního toku, které zmiňuje druhá část práce.

## 2 Teorie proudění

V této práci bude uvažován vzduch jako ideální plyn při izoentropickém proudění. Všechny změny budou vratné (energeticky izolované). Na úvod je tedy nutné přiblížit základní vztahy pro ideální plyn.

### 2.1 Úvodní vztahy pro ideální plyn

Pro termodynamicky rovnovážný stav ideálního plynu, obecně platí stavová rovnice:

$$p = \rho r T, \quad (1)$$

kde  $r$  je měrná plynová konstanta, kterou lze určit vztahem

$$r = \frac{R}{M_m}, \quad (2)$$

kde  $R=8314,472[\text{J}\cdot\text{kmol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$ ,  $M_m$  je molární hmotnost plynu  $[\text{kg}\cdot\text{kmol}^{-1}]$

V případě ideálního plynu dále platí Mayerova rovnice a poměr měrných tepelných kapacit

$$r = c_p - c_v, \quad (3)$$

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v}, \quad (4)$$

kde  $C_p$  a  $C_v$  jsou měrné tepelné kapacity pro které platí vztahy 5 a 6.

$$c_p = r \frac{\kappa}{\kappa - 1} \quad (5)$$

$$c_v = r \frac{1}{\kappa - 1} \quad (6)$$

Z těchto vztahů pak plynou rovnice pro určení vnitřní energie:

$$du = c_v dT \quad (7)$$

a entalpie

$$dh = c_p dT. \quad (8)$$

Pro ideální plyny platí Poissonova rovnice vratné adiabaty

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^\kappa = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}. \quad (9)$$

## 2.2 Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity (10) popisuje změnu hmoty v systému tak, že se s časem nemění [1]

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dv}{v} + \frac{dA}{A} = 0 \quad (10)$$

## 2.3 Pohybová rovnice

Vychází z předpokladu, že „časová změna hybnosti je rovna síle, která změnu způsobuje.“ [1]

$$\frac{dv^2}{2} + \frac{dp}{\rho} = 0 \quad (11)$$

## 2.4 I. TD zákon

První termodynamický zákon zní: „přírůstek vnitřní energie je roven rozdílu tepla přivedeného do systému a objemové práce vykonané systémem.“ [1]

$$dU = \delta Q - \delta W \quad (12)$$

## 2.5 Stlačitelnost

Stlačitelnost je jev, když se změní objem tekutiny a dojde zároveň ke změně její hustoty a tlaku. [1]

Součinitel izoentropické stlačitelnosti  $\delta_s$  je popsán následujícím vztahem

$$\delta_s = -\frac{1}{v} \left( \frac{\delta v}{\delta p} \right)_s \quad (13)$$

Rychlost zvuku je popsána rovnicí popisující u ideálního plynu závislost pouze na teplotě a druhu plynu jak popisuje rovnice 14.

$$a = \sqrt{\kappa r T} \quad (14)$$

Machovo číslo je dáno podílem rychlosti pohybu v daném prostředí a odpovídající rychlostí zvuku. [1]

$$M = \frac{c}{a} \quad (15)$$

Pokud je  $M > 1$  jedná se o nadzvukové proudění, naopak pokud je  $M < 1$  je proudění podzvukové. Při  $M \approx 1$  dochází v některých oblastech k překročení rychlosti zvuku, hovoříme tak o transsonickém proudění. [1]

## 2.6 Stlačitelné/nestlačitelné proudění

U stlačitelných látek je hustota závislá na tlaku. Jedná se nejčastěji o plyny. V případě nestlačitelných látek je objem při různých tlacích konstantní (jedná se nejčastěji o kapaliny, ideální stlačitelnost neexistuje.) Při konstantním toku nestlačitelné kapaliny zužujícím se kanálem dochází vlivem změny průřezu k nárůstu tlaku a tím i ke změně rychlosti proudění. Platí zákon kontinuity uvedený v rovnici 16. [1]

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (16)$$

Pro stlačitelné látky platí zákon bilance hmoty (rovnice 10), hybnosti (rovnice 11), energie (rovnice 19) a zákon bilance entropie (rovnice 17). [2]

$$ds = 0 \quad (17)$$

Při vyhodnocení hmotnostního toku tryskou uvažujeme plyn-stlačitelné médium. Nelze tedy použít vztahy pro nestlačitelné proudění, jelikož by vlivem změny průřezu trysky došlo ke změně tlaku a rychlosti proudění.

## 2.7 Tlak a jeho definice

Tlak měřený k nulové hodnotě (vakuu) je tlak absolutní. V případě přetlaku se jedná o kladnou hodnotu rozdílu atmosférického a absolutního tlaku, naopak podtlak je záporná hodnota daného rozdílu. Statický tlak  $P$  měříme na povrchu malého tělesa pohybujícího se stejnou rychlostí jako proudící médium. Celkový tlak  $P_c$  je tlak zabrzděného proudu tekutiny na povrchu malého tělesa. Pokud má zabrzděná tekutina konstantní hustotu, je výsledný tlak nazýván tlakem celkovým. Rozdílem celkového a statického tlaku dostáváme kinetický tlak  $q_k$ . [2]

$$P_c - P = q_k = \frac{1}{2} \rho c^2 \quad (18)$$

Kinetický tlak používáme pro měření proudění nestlačitelných tekutin pomocí tzv. Prandtlovy trubice.

Klidový tlak  $P_0$  je tlakem dokonale zabrzděné stlačitelné tekutiny.

Rozdílem klidového a statického tlaku dostáváme tlak dynamický  $P_d$ .

## 3 Izoentropické proudění ideálního plynu

Jedná se o proudění nahrazující skutečné proudění v krátkých kanálech a tryskách. Proudění bývá tepelně izolované, čímž dochází jen k vratným změnám plynu. [1]

### 3.1 Energetická rovnice

$$dh + d\frac{c^2}{2} = 0 \quad (19)$$

Rovnice 19 popisuje bilanci energie kdy se změnou entalpie dochází ke změně energie kinetické. Pro platnost energetické bilance při snižování entalpie musí naopak růst velikost kinetická energie.

### 3.2 Rovnice pro kontrolní objem

Rovnice kontinuity vyjadřuje zákon zachování množství látky. V ustáleném stavu se hmotnost kontrolního objemu nemění (rovnice 10). [2]

### 3.3 Rychlost při izoentropické expanzi

Z energetické rovnice 19 pro ideální plyn vyplývá vztah pro rychlost:

$$c = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa - 1} rT_0 \left[ 1 - \left( \frac{p}{P_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} \quad (20)$$

Z rovnice 20 vyplývá, že rychlost se při expanzi zvyšuje a při kompresi naopak snižuje.[1]

### 3.4 Nadzvukové/podzvukové proudění

Hugoniotova rovnice (21) popisuje vztah mezi Machovým číslem a průřezu kanálu.

$$\frac{dA}{A} = (M^2 - 1) \frac{dc}{c} \quad (21)$$

Když  $M < 1$  ve zužujícím kanále rychlost roste a naopak, když se průměr trysky zvětšuje, dochází k poklesu rychlosti proudění.

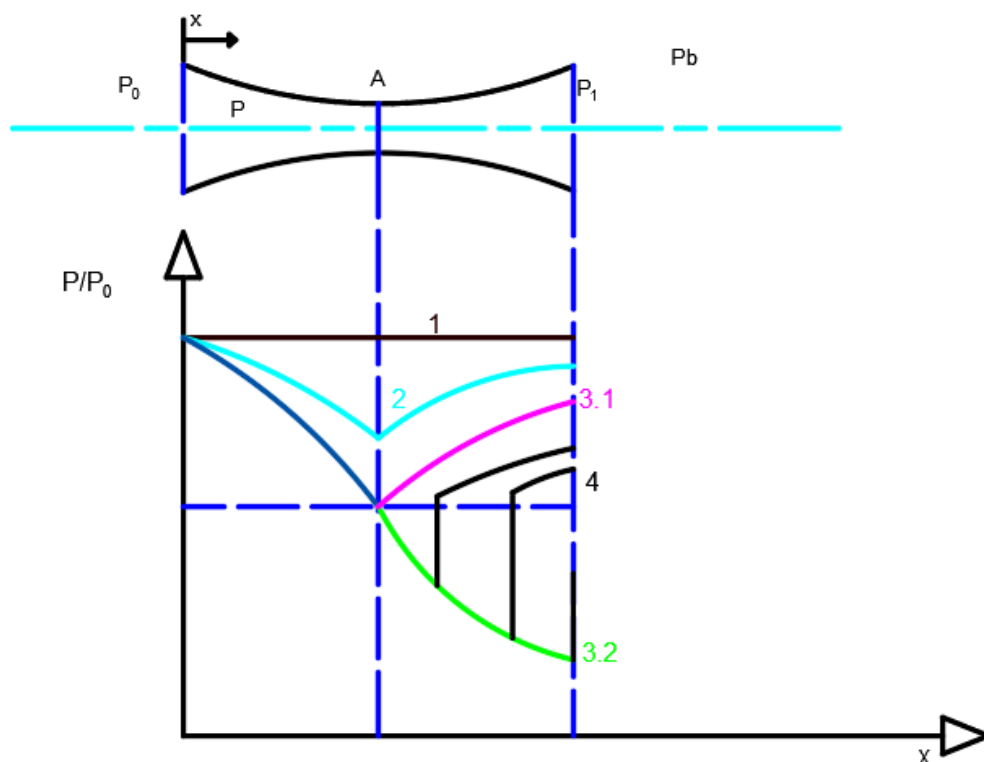
Když  $M > 1$  pro zvýšení rychlosti proudění, je nutné průměr trysky zvětšovat.

Změnou průřezu kanálu docílíme plynulý přechod z podzvukového do nadzvukového proudění. [1]

## 4 Proudění v tryskách

### 4.1 Režimy trysky

Tryska kombinovaného tvaru nám umožňuje proud urychlit z podzvukového proudění do nadzvukového. Nejprve dochází ve zužující části k urychlení proudění až do rychlosti zvuku, která se poté rozšiřující části při správných tlakových poměrech zvýší na nadzvukovou. [3]



Obr. 1 Režimy trysky

$P_0$  – tlak před tryskou.

$P$  – tlak v trysce (mění se po celé délce trysky).

$X$  – vzdálenost od vstupu do trysky.

$A$  – průměr hrdla trysky (uvažujeme 1D proudění).

$P_b$  – tlak za tryskou.

$P_1$  – tlak na výstupu z trysky.



V trysce kombinovaného tvaru může docházet k následujícím režimům, které graficky popisuje obrázek 1.

1. Pokud  $P_0=P=P_1$  nedochází k proudění.
2. Při snižování  $P_b$ , kdy bude platit, že  $P_b < P_0$  dochází postupně k urychlování proudění ve zužující se části trysky. Pro zužující se část platí že při snižování průřezu  $A$ , dochází k urychlování rychlosti proudění a k poklesu tlaku  $P$  (platí za předpokladu izotropického děje a podzvukového režimu trysky). V rozšiřující se části s rostoucím průřezem klesá rychlost a roste tlak. [3]
3. Pokud budeme tlak na výstupu nadále snižovat, dostaneme se do stavu tzv. ucpání, při kterém bude rychlost proudění v hrdle rovna Machovu číslu 1. Ve stavu ucpání proudí tryskou maximální hmotnostní tok. Dále nastávají dvě možnosti: **3.1** Pokud bude podíl tlaků  $P_0/P_b$  podzvukový ( $M < 1$ ), dojde v rozšiřující se části ke snižování rychlosti a růstu tlaku;
4. Při nadzvukovém ( $M > 1$ ) podílu tlaků  $P_0/P_b$  dochází v rozšiřující se části k nárůstu rychlosti, ale k poklesu tlaku. [3]
5. Rázová vlna. Vzniká mezi režimy **3.1** a **3.2** [3] (více v kapitole 4.2).

#### 4.1.1 Dynamické funkce

K výpočtu parametrů trysky, jako jsou návrhový a mezní tlak nebo poměr průřezů, nám slouží funkce, které jsou pro známý plyn. Při použití těchto funkcí je třeba v některých případech využít iterační postup. Parametrem je Machovo číslo. [3]

$$\frac{P}{P_0} = \left[ 1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2 \right]^{\frac{\kappa}{1-\kappa}} \quad (22)$$

$$\frac{A}{A_{kr}} = \frac{1}{M} \left[ \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right) \left( 1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{\kappa+1}{2(\kappa-1)}} \quad (23)$$

Pro získání hodnoty Machova čísla je třeba rovnici 23 řešit iteračním postupem. Tyto kroky v programu Matlab ukazuje Příloha 3 Skript pro výpočet Machova čísla.

Pro hmotnostní tok v aerodynamicky ucpané trysce kombinovaného tvaru platí Fliegnerův vztah,

$$qm = A_{kr} P_0 \sqrt{2rT_0} \quad (24)$$

kde index 0 značí podmínky před tryskou a  $A_{kr}$  je kritický průřez hrdla trysky.[1]

kde  $\psi$  je průtokový součinitel vyplývající ze vztahu 25.

$$\psi = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa - 1} \left[ \left( \frac{P}{P_0} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{P}{P_0} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} \quad (25)$$

Maximální hustota hmotnostního toku v hrdle nastává při tzv. „aerodynamickém ucpání trysky“, tj. kritických podmínkách, kdy

$$\psi_{max} = \sqrt{\frac{\kappa}{2} \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}}} = 0,4842 \text{ (pro } \kappa = 1,4). \quad (26)$$

Průtokový součinitel tedy závisí na tlakovém poměru, avšak při kritických podmínkách zůstává konstantní, a proto i hmotnostní tok je při kritickém proudění konstantní. Při kritických podmínkách také dochází v hrdle k aerodynamickému ucpání, dochází tedy k maximálnímu hmotnostnímu toku. [1]

Můžeme si tedy vyjádřit vztah mezi poměrem průřezů a průtokových součinitelů (rovnice 27).

$$\frac{A}{A_{kr}} = \frac{\psi_{max}}{\psi} \quad (27)$$

## 4.2 Rázové vlny

Při nadzvukovém proudění mohou v rozšiřující se části trysky vzniknout rázové vlny, které způsobují energetické ztráty. Jedná se tedy o nevratný adiabatický děj. [3]

## 5 Metody vyhodnocení průtoku

### 5.1 Průtokoměry

#### 5.1.1 Bezdotykový ultrazvukový průtokoměr



*Obr. 2 Ultrazvukový průtokoměr [4]*

Jedná se o takzvaný rychlostní průtokoměr, kde se na základě znalosti rychlosti proudícího média a průtočného průřezu měří rychlost proudícího média právě pomocí ultrazvuku. Ultrazvukové průtokoměry se dělí podle způsobu vyhodnocení signálu. [5]

- Průtokoměry trans-time

Vysílač a přijímač ultrazvukového vlnění jsou zabudovány uvnitř měřicí trubice. Často bývají průtokoměry konstruovány tak, aby bylo možné vysílat signál po i proti směru proudění média. Měří se doba mezi vysláním a přijmutím signálu, ze které je možné zjistit tzv. střední rychlost proudění a z ní dále hmotnostní průtok. [5]

- Průtokoměry využívající Dopplerův jev

Tyto průtokoměry lze použít pouze v případě, že plyn/kapalina obsahuje pevné částice, popř. vzduchové bubliny. Průtokoměr využívající Dopplerův jev se taktéž skládá z vysílače a přijímače. Vysílač vyšle signál, který se odrazí od vzduchové bubliny a přijímač jej zachytí. Následně dojde k vyhodnocení změny frekvence signálu oproti frekvenci signálu vyslaného. Tento rozdíl frekvencí odpovídá rychlosti proudění. [5]

### 5.1.2 Plovákové průtokoměry



***Obr. 3 plovákový průtokoměr [4]***

Plovák je v průhledné trubici nadnášen tokem kapaliny uvnitř svisle umístěné kuželovité trubice. Plovák (resp. rotační těleso) mění polohu dle změny průtoku uvnitř kuželovité trubice, čímž se mění průřez, kterým tekutina kolem tělesa protéká, avšak tlakový spád a rychlost proudění zůstávají díky změně průřezu konstantní. Poloha/výška plováku je měřítkem průtoku. Těleso (plovák) rotuje, díky čemuž zaujímá stabilní polohu. Výhodou použití plovákových průtokoměrů je absence napájení, čímž je lze používat ve výbušných prostředích. Další výhodou je přesné měření malých průtoků (<0,5 [dm<sup>3</sup>/hod]). Tyto průtokoměry se využívají taktéž při měření spotřeby plynu, nebo kapalných chemikálií, časté je také jejich použití v jaderném průmyslu. [6]

### 5.1.3 Vírové průtokoměry



***Obr. 4 Vírový průtokoměr [8]***

Fungují na principu vytváření vírů za překážkou. Frekvence tvorby vírů je při konstantním Strouhalově čísle úměrná rychlosti proudění. Z frekvence se v jednotce vypočítává hmotnostní tok. Nevýhodou těchto průtokoměrů je citlivost na šum a vibrace a taktéž nutnost dlouhých rovných úseků před průtokoměrem a za ním. [8]

### 5.1.4 Coriolisův průtokoměr

Z důvodu možnosti měření malých průtoků a malou chybou měřidla byl zvolen tento průtokoměr pro měření v praktické části této práce. Průtokoměr použitý při měření v praktické části je na obrázku 5.



***Obr. 5 Coriolisův průtokoměr***

## Coriolisův efekt uvnitř průtokoměru

Coriolisův efekt vyvolává Coriolisova síla, která působí na tělesa rotující v neinerciální vztažné soustavě. Síla se projevuje zakřivením trajektorie rotujících těles. Při proudění kapaliny skrze zakřivenou trubici uvnitř průtokoměru se trubice díky Coriolisově síle deformuje. Deformace trubice zaznamenávají senzory na každé straně trubice. Následně je vyhodnocen fázový posuv signálů, odpovídající hmotnostnímu toku. [7]

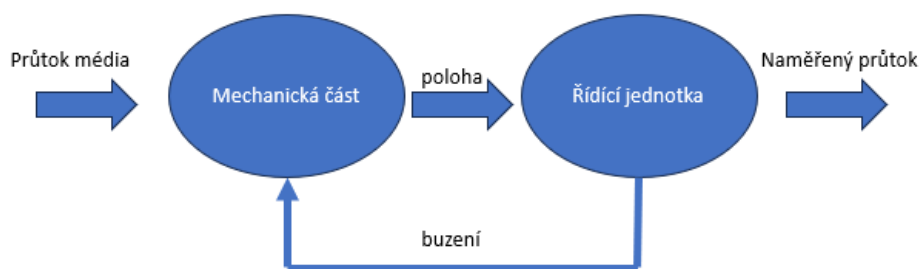
## Chyba a nejistota měření

Průtokoměry mají chybu měření při velmi nízkých hodnotách průtoku, což je dáno omezením snímačů měřit malé deformační účinky, tento jev nazýváme stabilita nuly. [7]

## Rozsah měření

Běžně je doporučovaný rozsah měření od 5 % do 100 % z maximálního průtoku. [7]

Konstrukce Coriolisova průtokoměru



**Obr. 6 Schéma konstrukce Coriolisova průtokoměru**

## Mechanická část

Měřicí trubice, příruby k připojení do potrubí. Tvary trubic se liší dle vhodnosti aplikace a volby výrobce průtokoměru. Z důvodu dynamického vyvážení se používá paralelní uspořádání trubic. [7]

## Řídící jednotka

Hlavní funkce jednotky jsou:

- Buzení kmitání:

Trubice jsou rozkmitávány na jejich vlastní frekvenci, která je závislá na mechanických parametrech a na hustotě tekutiny v trubici. Díky různým hustotám se může frekvence buzení měnit, z toho důvodu je nutné buzení řídit. [7]

- Měření výchylky

Výchylky trubic bývají velmi malé (desetiny  $\mu\text{m}$  – jednotky  $\text{mm}$ ), taktéž je nutno počítat s rozdílnými atmosférickými podmínkami apod. Z toho důvodu je nutné používat snímače se správným rozsahem u přímých trubic se používají z důvodu malé výchylky optické snímače a u zakřivených trubic indukční snímače. [7]

- Vyhodnocení průtoku a zpracování signálu

Na základě signálu od snímačů vyhodnocuje řídicí jednotka množství průtoku. [7]

## 5.2 ISO 5167-1 a ISO 5167-2

Tato práce se zabývá měřením hmotnostního toku tryskou. Je tedy nutné seznámení s metodikou měření. Základem jsou normy ISO 5167-1 a ISO 5167-2. Tímto způsobem lze měřit hmotnostní tok kapalin, plynů nebo páry. Provozní tlak až 400 000 kPa v potrubích od 25 do 12 000 mm. [9]

### 5.2.1 Princip metody měření

Základ principu tvoří zabudování clony (primárního prvku) do potrubí, ve kterém plným průřezem protéká tekutina. Zabudováním clony způsobíme rozdíl statických tlaků mezi měřenými částmi prvku. Následně je možné určit průtok díky znalosti statických tlaků a vlastností protékané látky. Pro určení hmotnostního toku musíme tedy znát geometrii clony a rozdíl statických tlaků před a za clonou. Hmotnostní tok vztahující se k diferenčním tlakům dle následujících vztahů. [9]

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \varepsilon_1 \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p \rho_1} \quad (28)$$

Hodnotu  $\rho_1$  lze určit ze stavové rovnice pro ideální plyn (rovnice 29).

$$\rho_1 = \frac{P_1}{rT_1} \quad (29)$$

Nebo platí vztah za vstupním prvkem (rovnice 30).

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \varepsilon_2 \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p \rho_2} \quad (30)$$

Dále platí vztah mezi  $\varepsilon_2$  a  $\varepsilon_1$ :

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \sqrt{1 + \frac{\Delta p}{p_2}} \quad (31)$$

### 5.2.2 Metoda určení poměru průměrů zvoleného prvku

Hodnoty  $C$  a  $\varepsilon$  většinou neznáme. Nejprve volíme typ primárního prvku, který použijeme a dále zvolíme průtok a odpovídající hodnotu diferenčního tlaku. Tyto hodnoty se pak dosadí do upraveného tvaru základní rovnice. [9]

$$\frac{C\varepsilon\beta^2}{\sqrt{1-\beta^4}} = \frac{4q_m}{\pi D^2 \sqrt{2\Delta p\rho}} \quad (32)$$

Kde hodnoty  $C$  a  $\rho$  mohou být buď za primárním prvkem ( $\rho_2, \varepsilon_2$ ) nebo před primárním prvkem ( $\rho_1, \varepsilon_1$ ). Dále poměr průměrů primárního prvku může být stanoven iterací.

### 5.2.3 Výpočet průtoku

Výpočet průtoku provedeme dosazením hodnot do rovnice (28).

### 5.2.4 Určení hustoty proudící tekutiny

Hustotu můžeme určit pomocí rovnice ideálního plynu (rovnice (1)), nebo ji lze přímo změřit před nebo za primárním prvkem. Statický tlak tekutiny měříme v rovině odběru tlaku před a za primárním prvkem. Teplotu měříme za primárním prvkem. [9]

### 5.2.5 Podmínky proudění

Průtok musí být stálý, nesmí pulzovat ani nijak výrazně kolísat. [9]

## 5.3 Vyhodnocení průtoku výpočtem

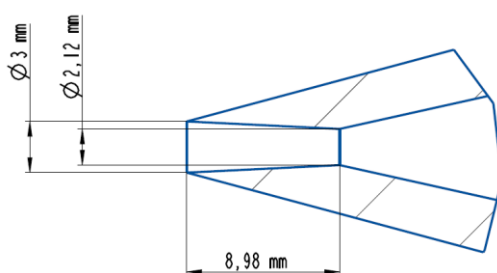
Hmotnostní tok Lavalovou tryskou lze také určit ze znalosti klidového tlaku  $P_0$ , geometrie průřezu a teploty z rovnice 33.



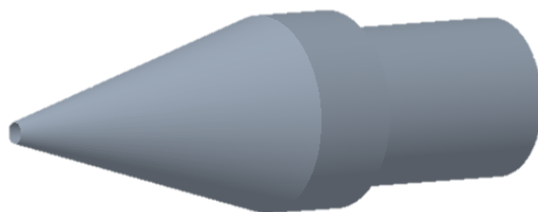
## 6 Praktická část

Praktická část probíhala v nové laboratoři KEZ. Jelikož se jednalo o jedno z prvních měření v této budově, bylo potřeba si laboratoř pro měření připravit. Nejprve byl upraven jeden z přívodů stlačeného vzduchu tak, aby bylo možné napojit měřicí soustavu. Potřebné vybavení a nástroje poskytla Katedra energetických zařízení TUL. Při sestavování měřicí aparatury bylo velmi důležité dbát na celkovou těsnost systému a zároveň bylo nutné dodržovat postupy stanovené normou ISO 5167-1 a ISO 5167-2.

Pro experiment a analytický výpočet byla použita tryska s geometrií na obrázcích 7 a 8.



*Obr. 7 Geometrie trysky použité pro měření*



*Obr. 8 Model trysky použité pro měření*

Danou trysku nechala v minulosti zkonstruovat a vyrobit Katedra energetických zařízení TUL. Malé geometrické rozměry trysky jsou stanoveny kvůli kapacitě kompresorových vzdušníků v nové laboratoři KEZ, která činí pouze 8 m<sup>3</sup>. Aby bylo možné provádět měření po delší dobu, je vyžadována tryska s malými rozměry. Pro potřeby této práce byl využit jen jeden vzdušník kompresoru o objemu 4 m<sup>3</sup>.

Na teoretický odhad možné doby měření byl sestaven v programu Matlab skript vycházející z následujících kroků. Hlavní výpočet vychází z Fliegnerova vztahu pro časově proměnlivý hmotnostní tok uvedený v rovnici 33.

$$\dot{m}_{(t)} = A_{krit} P_{0(t)} \psi_{(MAX)} \sqrt{\frac{2}{rT_0}} \quad (33)$$

Rovnici lze přepsat na diferenciální tvar:

$$\frac{d}{dt}(m) = A_{krit} P_{0(t)} \psi_{(MAX)} \sqrt{\frac{2}{rT_0}} \quad (34)$$

Pro hmotnost platí:  $m = \rho \cdot V$  a ze stavové rovnice ideálního plynu (1) určíme hustotu.

Výsledný vztah pro hmotnost:  $m = \frac{P_{0(t)}}{rT_0} V$ .

Rovnici 34 lze tedy napsat dle vztahu uvedeném v rovnici 35.

$$\frac{dP_{0(t)}}{dt} = A_{krit} P_{0(t)} \psi_{(MAX)} \sqrt{\frac{2}{rT_0}} * \frac{rT_0}{V} \quad (35)$$

Dále přepíšeme rovnici do integrálního tvaru (rovnice 36).

$$\int \frac{1}{P_0} dP_0 = A_{krit} \psi_{(MAX)} \sqrt{\frac{2}{rT_0}} \frac{rT_0}{V} \int dt \quad (36)$$

Po integraci dostaneme následující tvar.

$$\ln(P_0) + C = A_{krit} \psi_{(MAX)} \sqrt{\frac{2}{rT_0}} \frac{rT_0}{V} \cdot t \quad (37)$$

V čase  $t=0$  je integrační konstanta  $C = -\ln P_{01}$

Čas, za který se tlak uvnitř kompresoru klesne pod hodnotu mezního tlaku, tím pádem nebude docházet k aerodynamickému ucpání hrdla trysky a nebude jím protékat maximální hmotnostní tok je dán rovnicí 38.

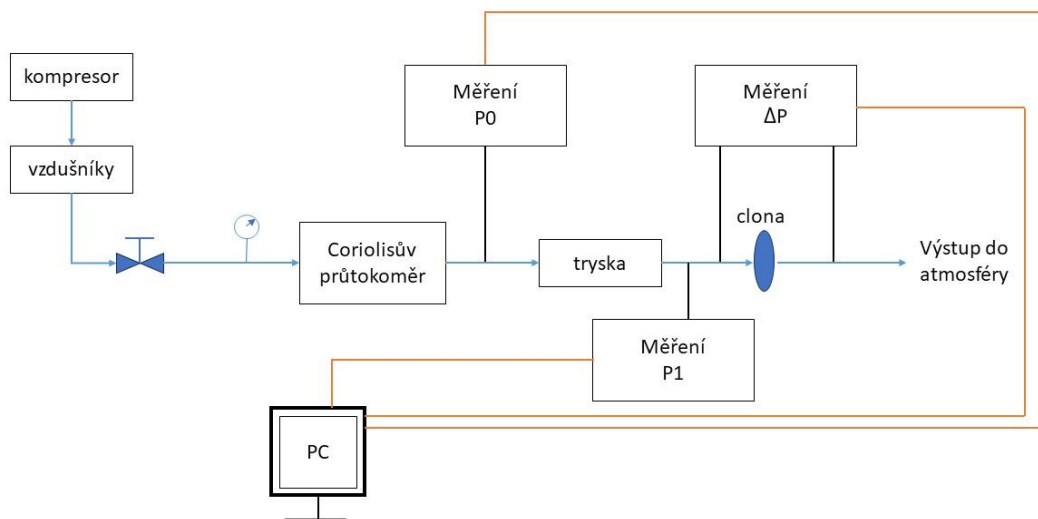
$$t[s] = \frac{\ln \frac{P_0}{P_{01}}}{A_{krit} \psi_{(MAX)} \sqrt{\frac{2}{rT_0}} \frac{rT_0}{V}} \quad (38)$$

Skript pro výpočet v programu Matlab (Příloha 1 Skript pro výpočet času měření).

Bereme-li v úvahu 100% těsnost potrubí a ideální plyn, tak měření může probíhat 48 min do poklesu tlaku z 1000 kPa na 600 kPa (uvedené hodnoty jsou přetlak), což je dostatečný čas pro nasbírání dostatečného množství dat.

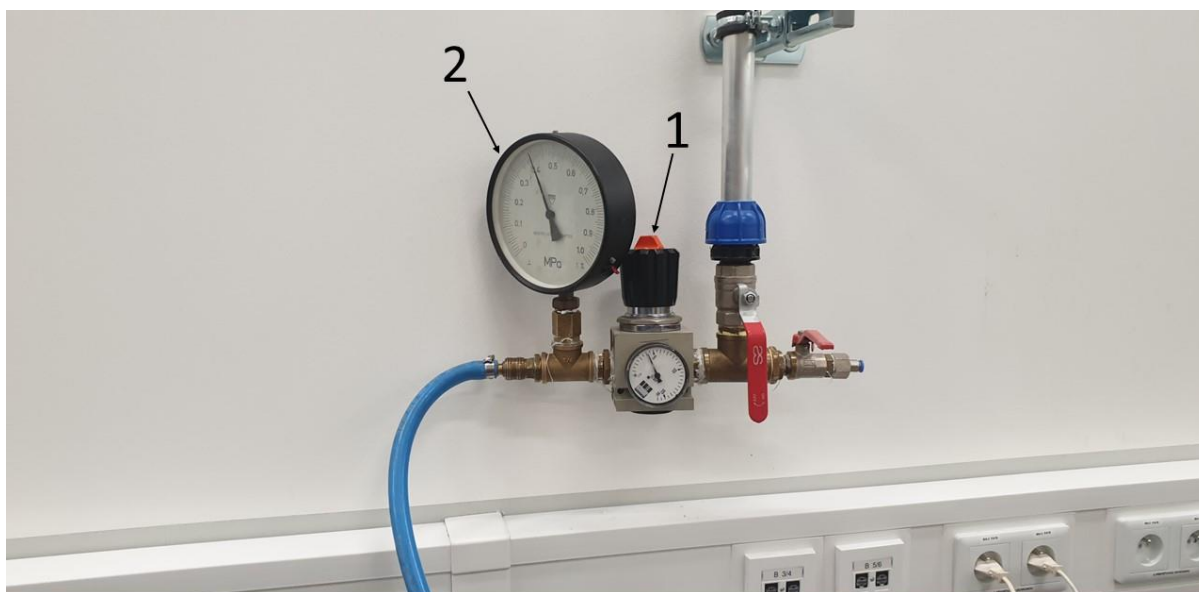
## 6.1 Měřicí soustava

Měřicí soustava pro měření tlaků byla sestavena dle uspořádání na obrázku 9.



**Obr. 9 Měřicí soustava**

Pro orientační seřízení vstupního tlaku před tryskou  $P_0$  byl použit redukční ventil s manometrem dle obrázku 10.

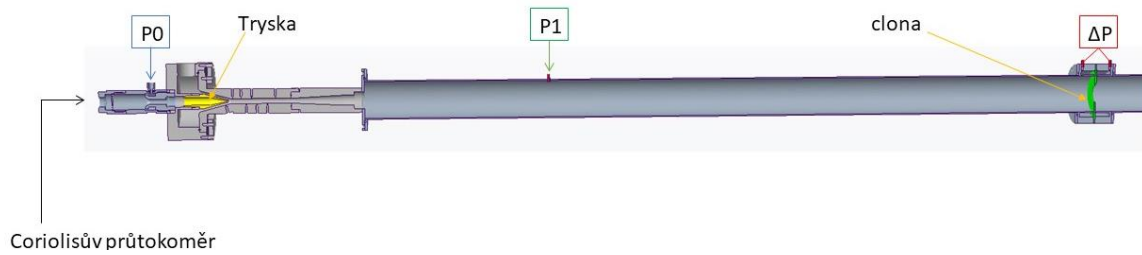


**Obr. 10 Zapojení přívodu vzduchu**

Pozice. 1: redukční ventil pro přesnější seřízení tlaku na vstupu

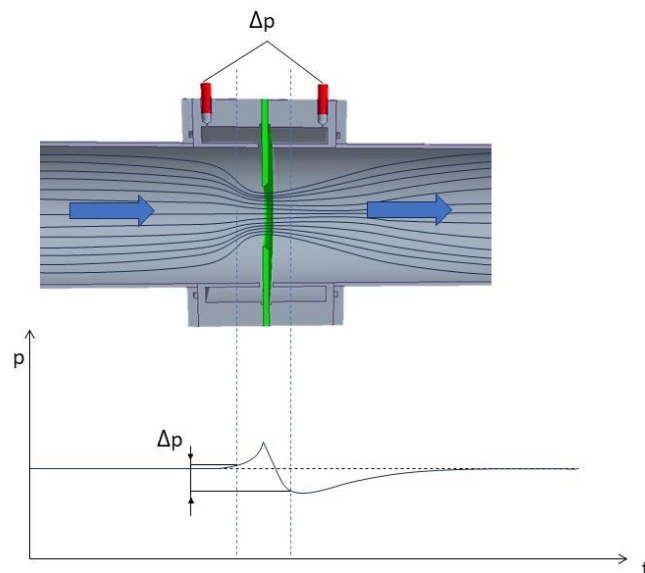
Pozice. 2: manometr pro orientační nastavení tlaku na vstupu

Pro detailnější přiblížení soustavy slouží obrázek 11, kde je vyobrazen řez měřicím potrubím.



**Obr. 11 Měřicí potrubí, řez**

Z redukčního ventilu na obrázku 10, byl veden stlačený vzduch nejprve do Coriolisova průtokoměru, odkud pak dále směřován do vstupní části, kde byl měřen tlak před tryskou P0. Za tryskou byl měřen tlak P1. Dále proud vzduchu pokračoval k primárnímu prvku, kde byla zaznamenávána tlaková diference. Tlaková diference v okolí primárního prvku, díky které lze vyhodnotit hmotnostní tok, vzniká vlivem změny průřezu. Dochází zde ke změně statického tlaku. V zúžení dochází vlivem odporu vzniklého změnou průřezů k nárustu tlaku. [9] Za clonou naopak vlivem změny průřezu k poklesu tlaku, odtud tlakový rozdíl  $\Delta P$ . Průběh vzniku tlakové diference v okolí clony ukazuje obrázek 12.



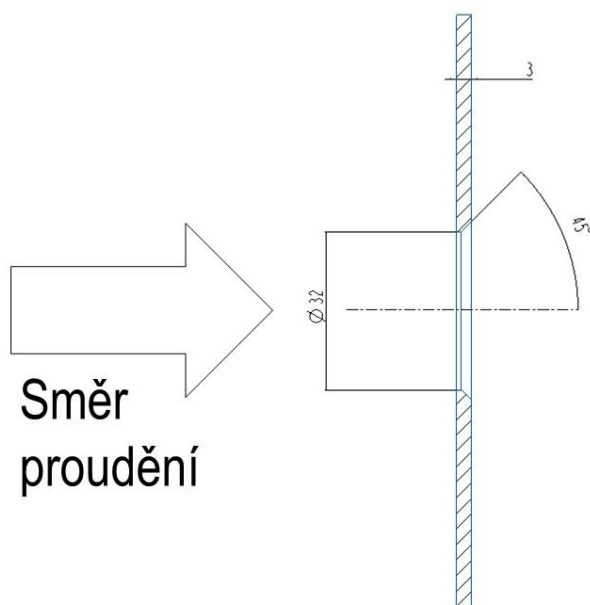
**Obr. 12 Průběh statického tlaku v okolí clony [9]**

### 6.1.1 Primární prvek

V případě této práce byla jako primární prvek použita tenká clonová deska. [9]

Primární prvek musí být zabudován mezi dvěma úseky přímého válcového potrubí konstantního průřezu, v našem případě  $D=72,1$  mm, ve kterém nejsou přítomny další překážky, které by mohly způsobovat, že by proudění před primárním prvkem nebylo po celém průřezu potrubí, z toho důvodu musí být i vnitřní povrch potrubí čistý. Minimální délka potrubí před a za primárním prvkem je dána normou. [9]

Geometrie a tvar normované clony použité při měření se směrem zabudování vůči směru proudění jsou uvedeny na obrázku 13.



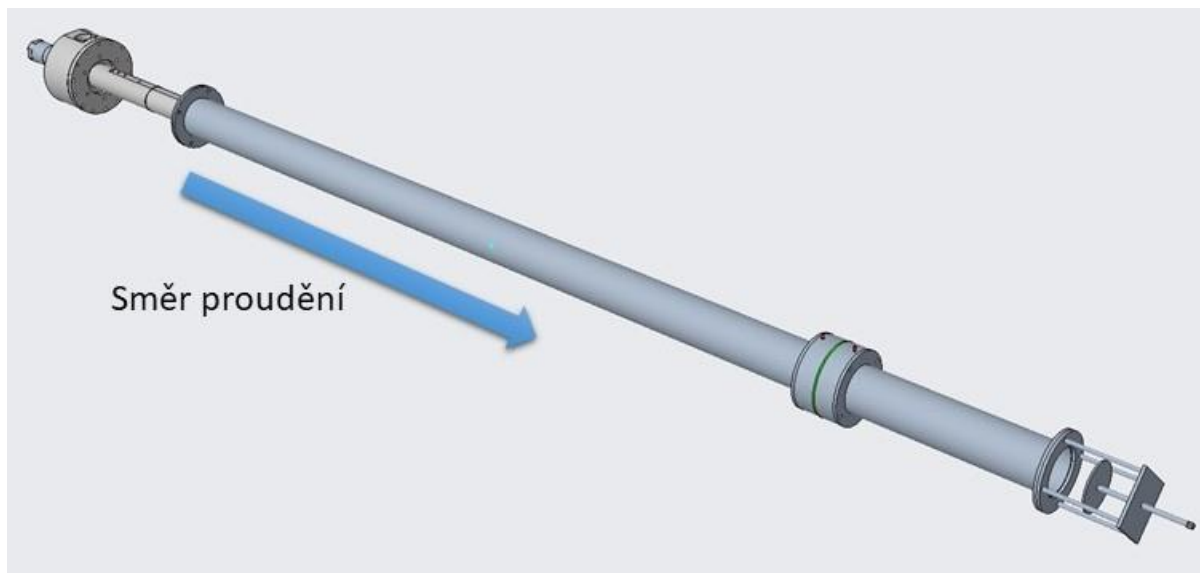
**Obr. 13 Geometrie clony**

Výtažek z normy popisuje způsob zabudování clony a její geometrii

*„Zabudovaná clona musí být souosá s osou potrubí. Clona se při měření nesmí deformovat za provozních podmínek více než o 1 %, taktěž je nutné dbát na bezpečné zabudování clony bez jakéhokoli poškození nebo deformace. Tloušťka clonové desky musí být menší než  $0,05D$  a větší než tloušťka otvoru clony. V našem případě je tloušťka stěny větší než otvoru clony, takže je nutné přidat zkosení hrany o úhel  $45^\circ$ . Průměr otvoru clony  $d=32$  mm musí být větší nebo roven 12,5 mm. Poměr  $D/d=\beta$  je vždy  $\geq 0,1$ . Použitá clona je clona s přírubovými odběry to znamená, že před prvkem (clonou) a za prvkem musí být zabudován odběr tlaku. Vzdálenost  $l$  je vzdálenost mezi osou odběrového místa tlaku a rovinou stěny clony a taktěž osa odběrového místa musí být svírat s osou potrubí úhel  $90^\circ$ . Přední a zadní odběr musí mít stejný průměr a jejich tvar je buď válcový, nebo kruhový.“ [9]*

### 6.1.2 Měřicí potrubí

Z důvodu přesnosti geometrie a kvality povrchu byly použity pro sestavení měřicího potrubí tažené trubky z nerezové oceli, které již byly využívány pro předchozí měření. Na obrázku 14 je zobrazen model trati vzduchového potrubí



*Obr. 14 Model trati vzduchového potrubí pro měření*

## 6.2 Měřicí přístroje

Pro měření veličin, které jsou nezbytné pro analytický model a vyhodnocení dle normy, byly v laboratoři použity přístroje pro měření tlaků, teploty a atmosférických podmínek. Tyto přístroje byly nejprve kalibrovány výrobcem a poté podstoupily finální kalibraci vedoucím práce před samotným měřením.

### 6.2.1 Měření atmosférických podmínek

*Tab. 1 Měření atmosférických podmínek*

Výrobce	Testo
Typ	435, sonda (0632.1535)
Měřicí rozsah	-50 až +150°C
Přesnost při měření teploty	± 0,2 °C
Přesnost při měření atmosférického tlaku	±5 hPa



**Obr. 15 Sonda 0632.1535 [11]**



**Obr. 16 Měřicí přístroj Testo 435 [15]**

### 6.2.2 Měření tlaku P0

**Tab. 2 Měřicí přístroj tlak P0**

Výrobce	Kulite semiconductor Products, Inc.
Přesnost	0,5 % z max rozsahu

### 6.2.3 Měření tlaku P1

**Tab. 3 Měřicí přístroj tlak P1**

Výrobce	Kulite semiconductor Products, Inc.
Přesnost udávaná výrobcem	0,5% z max rozsahu

### 6.2.4 Měření tlakové difference $\Delta P$

**Tab. 4 Měřicí přístroj tlaková difference**

Výrobce	GE
Typ	LP 1000 Series
Měřicí rozsah	0,25 až 20 mbar
Přesnost	Odchylka 0,2 % z max rozsahu



**Obr. 17 Diferenční tlakový snímač GE LP1000 [12]**

### 6.2.5 Měření průtoku

**Tab. 5 Měření průtoku**

Výrobce	Siemens
Typ	SITRANS F C MASSFLO 6000
Přesnost	Odchylka 5 % z měřené hodnoty



**Obr. 18 Siemens sitrans FC MASS 6000 [13]**



### 6.3 Analytický model

Pro kontrolu výsledků z experimentu, bylo nutné připravit analytický model. Pro znalost teoretických hodnot hmotnostního toku bylo využito Fliegnerova vztahu z rovnice (24) a známých vztahů pro ideální plyn. Uvažujeme izolovanou soustavu, tj. nedochází k výměně tepla s okolím (ani ke ztrátám), dále uvažujeme ideální plyn a soustavu v rovnovážném stavu.

Pro výpočet je nutné znát tyto základní parametry:

- klidová teplota
- klidový tlak
- Poissonova konstanta pro vzduch
- průměr hrdla trysky
- měrná plynová konstanta
- protitlak (tlak za tryskou, v našem případě atmosférický tlak).

Dané parametry známe z výkresu trysky a naměřených atmosférických podmínek v laboratoři, pracovní látkou je vzduch. Postup výpočtu v programu Matlab (viz Příloha 2 Skript pro výpočet dle Fliegnerova vztah).

Pro měření hmotnostního toku bylo nezbytné, aby proudění probíhalo celým jejím průřezem. Důležité bylo zajistit, že hmotnostní tok před tryskou je stejný jako za tryskou. Z tohoto důvodu bylo potřeba určit návrhové a mezní Machovo číslo, pro které je tryska navržena. Na základě těchto hodnot lze poté vypočítat návrhový a mezní tlak. K výpočtu Machových čísel budeme využívat dynamické funkce.

Skript výpočtu v programu Matlab (Příloha 3 Skript pro výpočet Machova čísla).

Tryska je navržena pro tato Machova čísla:

- **návrhové Machovo číslo**  $M1 = 2,2$  Mach
- **mezní Machovo číslo**  $M2 = 0,31$  Mach

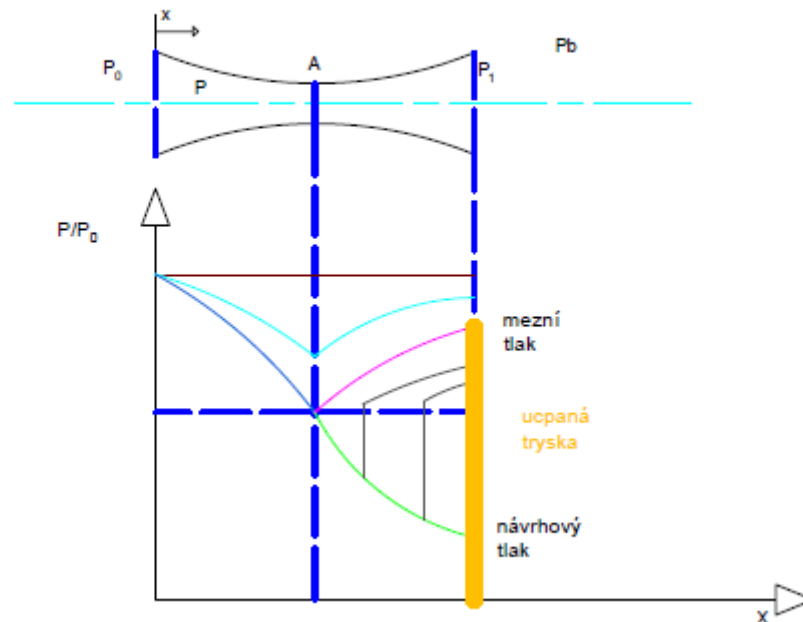
V dalším kroku určíme návrhový a mezní tlak pro danou trysku pomocí dynamických funkcí. Pro měření jsme z důvodu rozsahu měřicích přístrojů, bezpečnosti a kapacity kompresoru byly použity hodnoty absolutních tlaků 497kPa, 597kPa a 697kPa.

Příloha 3 ukazuje příklad postupu výpočtu návrhových a mezních tlaků pro absolutní tlak 697 kPa.

Následující tlaky vypočítané v programu Matlab jsou uvedeny jako absolutní

- 697kPa: návrhový tlak= 65,3kPa; mezní tlak= 653kPa
- 597kPa: návrhový tlak= 55,9kPa; mezní tlak= 559kPa
- 497kPa: návrhový tlak= 46,6kPa; mezní tlak= 466kPa

Výsledky nám ukazují, absolutní hodnoty návrhových a mezních tlaků. Aby proudění bylo podzvukové je třeba dbát, aby hodnota protitlaku byla nad návrhovým tlakem, a zároveň byla nižší, než je hodnota mezního tlaku. Oblasti mezi návrhovým a mezním tlakem společně s oblastí ucpané trysky ukazuje obrázek 19.



**Obr. 19 Režimy trysky**

Výsledky hodnot z analytického modelu jsou uvedeny v tabulkách 18,19 a 20.

## 6.4 Měření a vyhodnocení průtoku normami ISO 5167-1 a 5167-2

### 6.5 Měření

Celkem byla provedena dvě měření. K získání hmotnostního toku normou, je potřeba změřit:

- atmosférické podmínky a teplotu v laboratoři
- absolutní tlak před tryskou
- rozdíl tlaků před clonou a za clonou

### 6.5.1 První měření (14. 06. 2023) – tryska v režimu s rázovou vlnou

**Tab. 6 atmosférické podmínky a teplota (první měření)**

<b>Přístroj</b>	Testo 435, sonda (0632.1535)
<b>Teplota</b>	24 ± 0,2 °C
<b>Vlhkost</b>	33 % ± 2 %
<b>Atmosférický tlak</b>	97 ± 0,5 kPa

**Tab. 7 Tlak p0 před tryskou (první měření)**

<b>Přístroj</b>	Kulite
<b>Tlak P0</b>	488 ± 2kPa
	590 ± 2kPa
	708 ± 2kPa

**Tab. 8 Tlak p1 za tryskou (první měření)**

<b>Přístroj</b>	Kulite
<b>Tlak P1</b>	97,6kPa
	97,8kPa
	98,1kPa

**Tab. 9 Rozdíl tlaků (první měření)**

<b>Přístroj</b>	GE LP 1000
<b>Δ P</b>	27,9 ± 0,1Pa
	39,6 ± 0,1Pa
	54,8 ± 0,4Pa

Dle výsledků měření tlaku P1 (tabulka 8), je možné určit, že tryska pracuje mezi návrhovým a mezním režimem, což znamená, že v ní vzniká rázová vlna.

### 6.5.2 Druhé měření (27.06.2023) – tryska v režimu s rázovou vlnou

**Tab. 10 Atmosférické podmínky a teplota (druhé měření)**

<b>Přístroj</b>	Testo 435, sonda (0632.1535)
<b>Teplota</b>	21,4 ± 0,2 °C
<b>Vlhkost</b>	25 % ± 2 %
<b>Atmosférický tlak</b>	97 ± 0,5kPa

**Tab. 11 Tlak p0 před tryskou (druhé měření)**

<b>Přístroj</b>	Kulite
<b>Tlak P0</b>	505 ± 2kPa
	603 ± 2kPa
	700 ± 2kPa

**Tab. 12 Tlak  $p_1$  za tryskou (druhé měření)**

Přístroj	Kulite
Tlak P1	97,6kPa
	97,8kPa
	98,1kPa

**Tab. 13 Rozdíl tlaků (druhé měření)**

Přístroj	GE LP 1000
$\Delta P$	$26,5 \pm 0,2\text{Pa}$
	$38,2 \pm 0,2\text{Pa}$
	$51,8 \pm 0,3\text{Pa}$

Z naměřených tlaků následoval dle normy výpočet expanzního součinitele před clonou.

$$\varepsilon_1 = 1 - (0,41 + 0,35\beta^4) \frac{\Delta p}{\kappa p_1} \quad (39)$$

Pro všechny tlaky vychází expanzní součinitel  $\varepsilon=0,98$ .

Nejistota expanzního součinitele je 0,001. [9]

### 6.5.3 Výpočet hmotnostního toku z naměřených hodnot

Průtok je dán rovnicí 40. [9]

$$q_m = \frac{C \varepsilon_1 \frac{\pi}{4} d^2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{2\Delta p \rho_1} \quad (40)$$

Dále musíme znát hustotu vzduchu před clonou, kterou určíme z rovnice 1.

$$\rho_1 = 1,18 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_2 = 1,18 \text{ kg/m}^3$$

Jelikož rovnice obsahuje proměnné, které jsou na sobě navzájem závislé, je nutné použít iterační výpočet.

Vztah pro Reynoldsovo číslo je

$$Re_D = \frac{4q_m}{\pi\mu D}, \quad (41)$$

kde  $\mu$  je dynamická viskozita při teplotě  $24^\circ\text{C} = 1,83 \times 10^{-5}$ .

Vztah pro součinitel průtoku C je

$$C = 0,5961 + 0,216\beta^8 - 0,216\beta^8 + 0,000521 \left( \frac{10^6 \beta}{Re_D} \right)^{0,7} + (0,0188 + 0,0063A1)\beta^{3,5} \left( \frac{10^6}{Re_D} \right)^{0,3} . \quad (42)$$

Nejprve zvolíme hodnotu  $C=0,5961$  a dosadíme do rovnice 40, výsledek z rovnice 40 dosadíme do rovnice 41, takto pokračujeme do té doby, dokud se výsledek  $qm$  nemění.

Na iterační výpočet byla v programu Matlab vytvořena Příloha 4 Skript pro iterační výpočet hmotnostního toku .

Výsledky hmotnostního toku jsou v následujících tabulkách (14 a 15).

**Tab. 14 Hmotnostní tok 14. 06. 2023**

P0(14.06.)	qm [g/s]
488 ± 2kPa	3,92
590 ± 2kPa	4,67
708 ± 2kPa	5,49

**Tab. 15 Hmotnostní tok 27. 06. 2023**

P0(27.06.)	qm [g/s]
505 ± 2kPa	3,82
603 ± 2kPa	4,59
700 ± 2kPa	5,34

Z naměřených dat byl z normy vypočítán hmotnostní tok.

V tabulce 16 jsou uvedeny výsledky z Coriolisova průtokoměru. Měření Coriolisovým průtokoměrem probíhalo z kapacitních důvodů pouze při druhém měření.

**Tab. 16 Hmotnostní tok z Coriolisova průtokoměru**

P0(27.06.)	qm [g/s]
505 ± 2kPa	3,91
603 ± 2kPa	4,65
700 ± 2kPa	5,42

Nejistota hmotnostního toku vyhodnoceného Coriolisovým průtokoměrem je 5 % z naměřené hodnoty.

#### 6.5.4 Nejistoty

Měření neprobíhala vždy za stejných podmínek a jejich výsledkem bylo velké množství naměřených dat. Z toho důvodu je třeba určit nejistotu typu A ( $U_A$ ). Z důvodu udávaných nejistot výrobcem nejistotu typu B ( $U_B$ ). Postup vyhodnocení nejistot je popsáno v normě ISO5167-1.

#### Nejistota B

dle normy [9] jsou zdroje nejistot:

- součinitel průtoku  $C$
- součinitel expanze  $\varepsilon$
- průměr otvoru clony  $d$
- tlaková diference  $\Delta P$
- hustota vzduchu před clonou  $\rho_1$

Nejistota součinitele průtoku je dána normou

$$u_B(C) = 0,005 \quad (43)$$

Nejistota součinitele expanze  $\xi$  dle normy.

$$u_B(\varepsilon) = 0,001 \quad (44)$$

Nejistota otvoru průměru trubky je dána výrobní tolerancí.

$$u_B(D) = 0,00020m \quad (45)$$

Nejistota otvoru clony je dána výrobní tolerancí.

Nejistota tlakové diference je dána výrobcem měřidla.

$$u_B(\Delta P) = 0,003Pa \quad (46)$$

Nejistota hustoty dána nejistotou uvedenou výrobcem měřidla.

$$u_B(\rho) = 0,2kg/m^3 \quad (47)$$

U tlakové diference probíhalo měření až 50x za vteřinu, z toho důvodu je pro správnost vyhodnocení určit nejistotu typu **A**.

## Nejistota typu A

Ze získaných hodnot z obou měření se určí nejistota  $u_A$  jako směrodatná odchylka naměřených hodnot.

Měření 14.06.

$$u_A(\Delta P_{497kPa}) = 0,14Pa \quad (48)$$

$$u_A(\Delta P_{597kPa}) = 0,14Pa \quad (49)$$

$$u_A(\Delta P_{697kPa}) = 0,41Pa \quad (50)$$

Měření 27.06

$$u_A(\Delta P_{497kPa}) = 0,12Pa \quad (51)$$

$$u_A(\Delta P_{597kPa}) = 0,11Pa \quad (52)$$

$$u_A(\Delta P_{697kPa}) = 0,45Pa \quad (53)$$

Z důvodu velkého množství naměřených hodnot  $\Delta P$ , je nutné určit kombinovanou nejistotu.

Obecně se celková nejistota rovná součtu kvadrátů nejistot (rovnice54).

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (54)$$

Měření 14.06

$$u_C(\Delta P_{497.}) = 0,14Pa \quad (55)$$

$$u_C(\Delta P_{597}) = 0,14Pa \quad (56)$$

$$u_C(\Delta P_{697}) = 0,41Pa \quad (57)$$

Měření 27.06.

$$u_C(\Delta P_{497}) = 0,12Pa \quad (58)$$

$$u_C(\Delta P_{597}) = 0,11Pa \quad (59)$$

$$u_C(\Delta P_{697}) = 0,45Pa \quad (60)$$

Celková nejistota hmotnostního toku určená normou [9] je dána následujícím vztahem.

$$\begin{aligned} \frac{\delta_{qm}}{q_m} = & \left[ \left( \frac{\delta_C}{C} \right)^2 + \left( \frac{\delta_{\varepsilon_1}}{\varepsilon_1} \right)^2 + \left( \frac{2\beta^4}{1-\beta^4} \right)^2 \left( \frac{\delta_D}{D} \right)^2 \right. \\ & \left. + \left( \frac{2}{1-\beta^4} \right)^2 \left( \frac{\delta_d}{d} \right)^2 + \frac{1}{4} \left( \frac{\delta_{\Delta P}}{\Delta P} \right)^2 + \frac{1}{4} \left( \frac{\delta_{\rho_1}}{\rho_1} \right)^2 \right]^{0,5} \end{aligned} \quad (61)$$

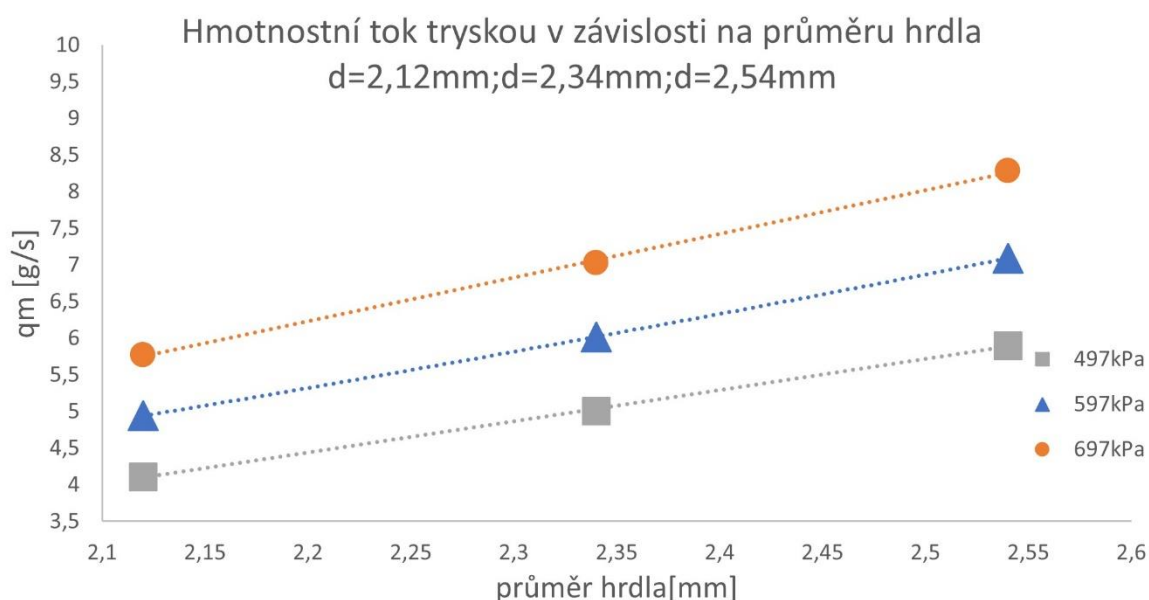
Po dosažení dostáváme celkovou nejistotu uvedenou v tabulce 17.

**Tab. 17 Celkové nejistoty**

<b>14.06.</b>
$u_{qm(497kPa)}=0,12g/s$
$u_{qm(597kPa)}=0,12g/s$
$u_{qm(697kPa)}=0,23g/s$
<b>27.06.</b>
$u_{qm(497kPa)}=0,12g/s$
$u_{qm(597kPa)}=0,11g/s$
$u_{qm(697kPa)}=0,25g/s$

## 7 Diskuse výsledků

Na základě analytického modelu výpočtu průtoku pomocí Fliegnerova vztahu (uvažujeme aerodynamicky ucpanou trysku v návrhovém režimu), kde hmotnostní tok v případě kritického proudění případě závisí pouze na druhu látky, kritickém průřezu hrdla trysky, tlaku a teplotě před tryskou  $P_0$  lze výsledky shrnout do grafu. Obrázek 20 nám ukazuje, že při proudění ucpanou tryskou, má hmotnostní tok lineárně rostoucí tendenci v závislosti na tlaku  $P_0$  a průměru hrdla.



**Obr. 20 Závislost hmotnostního toku na průměru hrdla**



**Tab. 18 hmotnostní tok analytický model 2,12 mm**

$P_0$ (nominální hodnoty absolutních tlaků)	$d_{krit}=2,12\text{mm}$
497kPa	4,13g/s
597kPa	4,96g/s
697kPa	5,79g/s

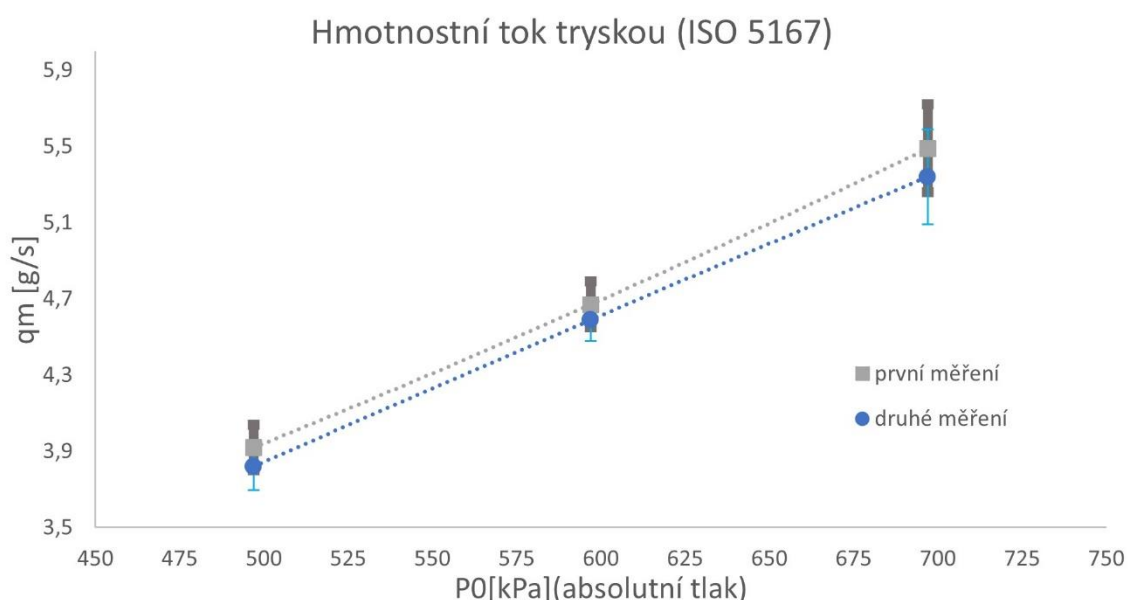
**Tab. 19 hmotnostní tok analytický model 2,34 mm**

$P_0$ (nominální hodnoty absolutních tlaků)	$d_{krit}=2,34\text{mm}$
497kPa	5,01g/s
597kPa	6,02g/s
697kPa	7,03g/s

**Tab. 20 hmotnostní tok analytický model 2,54 mm**

$P_0$ (nominální hodnoty absolutních tlaků)	$d_{krit}=2,54\text{mm}$
497kPa	5,90g/s
597kPa	7,09g/s
697kPa	8,28g/s

Při vyhodnocování průtoku dle norem ISO 5167-1 a 5167-2 byla použita měřidla s různými hodnotami přesností, které společně s množstvím získaných dat měly vliv na nejistoty měření. V tabulce 17 jsou uvedeny chybové úsečky, které jsou na obrázku 21 zobrazené svislou čarou. Vyšší hodnota nejistot při nominální hodnotě absolutního tlaku 697kPa je dáno vyšší celkovou nejistotou  $\Delta P$ , která vznikla z důvodu vyšší směrodatné odchylky naměřených dat.

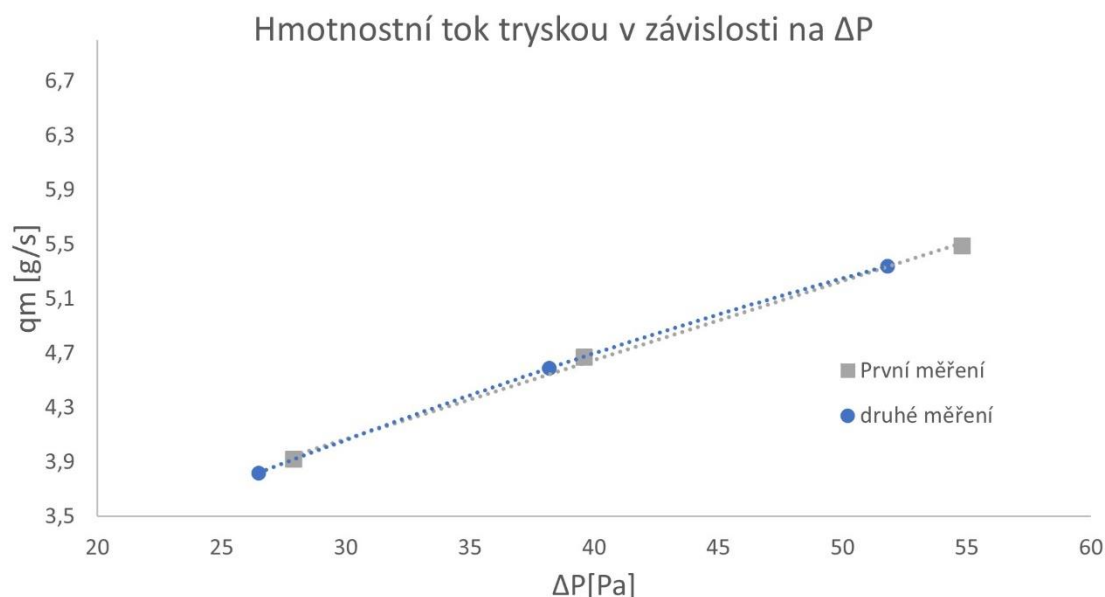
**Obr. 21 Hmotnostní tok tryskou dle (ISO 5167-1)**

Výsledky z postupů vyhodnocení hmotnostních toků dle norem ISO 5167-1 a 5167-2 společně s nejistotami jsou uvedeny v tabulce 21.

**Tab. 21 Výsledný hmotnostní tok vyhodnocený pro trysku  $d=2,12\text{mm}$  dle ISO 5167-1 a 5167-2**

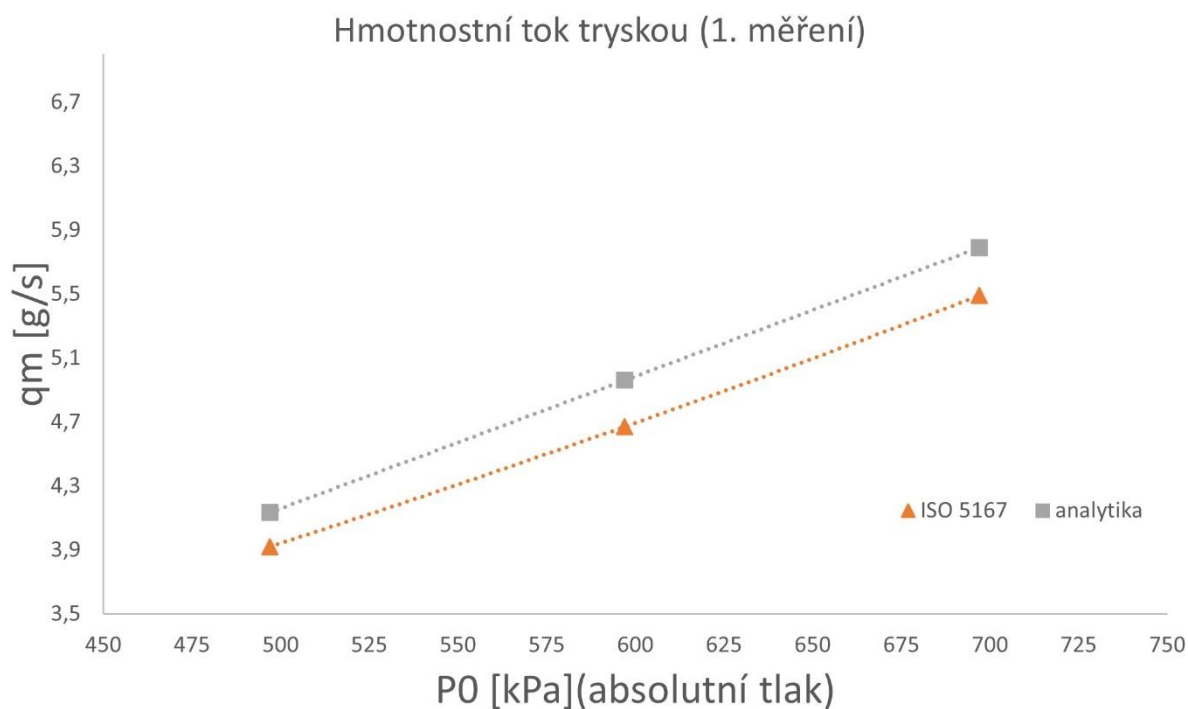
$P_0$ (14.06.) (nominální hodnoty abs. tlaků)	$q_m$
497kPa	$3,92 \pm 0,12\text{g/s}$
597kPa	$4,67 \pm 0,12\text{g/s}$
697kPa	$5,49 \pm 0,23\text{g/s}$
$P_0$ (27.06.) (nominální hodnoty abs tlaků)	$q_m$
497kPa	$3,82 \pm 0,12\text{g/s}$
597kPa	$4,59 \pm 0,11\text{g/s}$
697kPa	$5,34 \pm 0,25\text{g/s}$

Pro lepší přiblížení výsledků slouží obrázek 22 zobrazující závislost toku na rozdílu tlaků před a za clonou, kde je patrné že hmotnostní tok roste s velikostí tlakové difference v oblasti primárního prvku. Tvar křivek ukazuje vliv tlakové difference na cloně na hmotnostním toku.

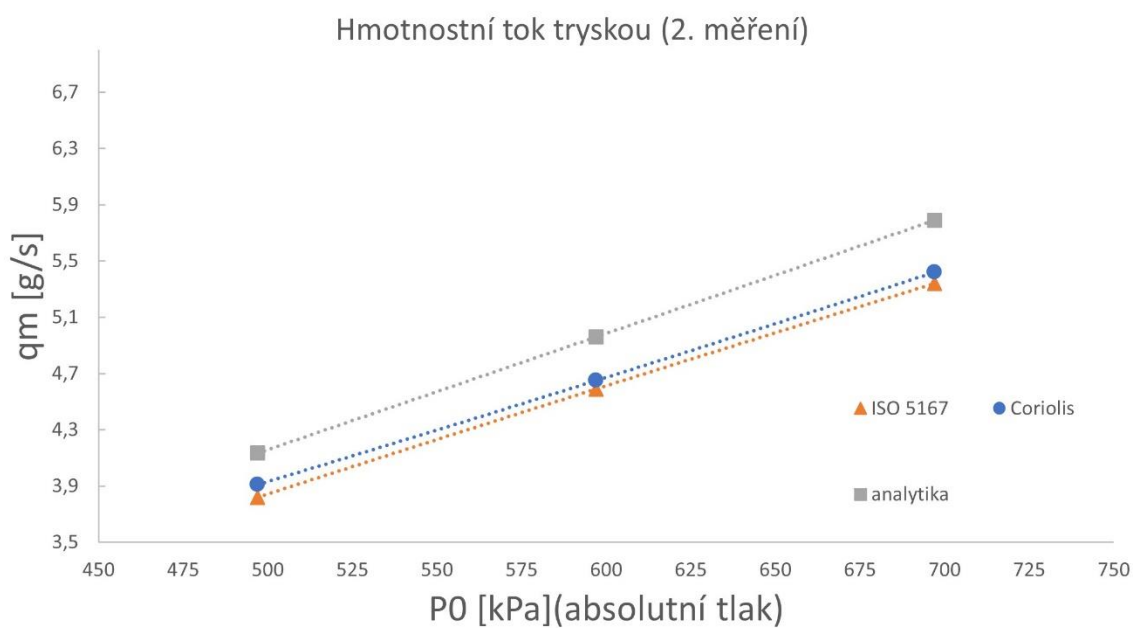


**Obr. 22 Hmotnostní tok tryskou v závislosti na  $\Delta P$**

Porovnání hmotnostního toku pomocí normy, Coriolisova průtokoměru a analytického modelu je znázorněno na obrázcích 23 a 24. Při analytickém modelu uvažujeme adiabatický ideální plyn a neuvažujeme tlakové ztráty. Hmotnostní tok vyhodnocený Coriolisovým průtokoměrem se oproti vyhodnocení toku normou více blíží ideálnímu analytickému modelu a to z důvodu vysoké přesnosti měření přístroje. Taktéž bylo možné zamezit tlakovým ztrátám na přívodu vzduchu do průtokoměru lépe, než tomu bylo u přívodu vzduchu do měřicího potrubí.



**Obr. 23 Hmotnostní tok tryskou (1. měření)**



**Obr. 24 Hmotnostní tok tryskou (2. měření)**

V následujících tabulkách jsou uvedené relativní odchylky výsledků měření od analytického modelu.

**Tab. 22 Relativní odchylka výsledků prvního měření od analytického modelu**

P0(nominální hodnoty absolutních tlaků)	Relativní odchylka
497kPa	5,5%
597kPa	6,2%
697kPa	5,5%

**Tab. 23 Relativní odchylka výsledků z Coriolisova průtokoměru od analytického modelu**

P0(nominální hodnoty absolutních tlaků)	Relativní odchylka
497kPa	5,5%
597kPa	6,2%
697kPa	6,3%

**Tab. 24 Relativní odchylka výsledků druhého měření od analytického modelu**

P0(nominální hodnoty absolutních tlaků)	Relativní odchylka
497kPa	8,2%
597kPa	8,0%
697kPa	8,4%

Porovnáním výsledů z tabulek 22,23 a 24 je zřejmé, že pro vyhodnocení hmotnostního toku je vhodnější použití Coriolisova průtokoměru, než použít postupy uvedené normou, jelikož výsledky z průtokoměru se více blíží teoretickému analytickému modelu. Dále je z tabulky 22 zřejmé, že výsledky z prvního měření byly blíže k analytickému modelu, než toho bylo u druhého měření, kde byl použit i Coriolisův průtokoměr. Na výstupu z průtokoměru tak pravděpodobně docházelo vlivem nesprávného zapojení k drobným tlakovým únikům.

## 8 Závěr

V této práci bylo cílem vyhodnocení hmotnostního toku v trysce kombinovaného tvaru. Pro seznámení s problematikou byla v první části popsána teorie proudění společně s různými metodami vyhodnocení toku a potřebnými postupy pro jeho vyhodnocení.

Ve druhé části práce byla popsána problematika měřicí tratě, použitých přístrojů a jejich nejistoty. Součástí práce byl i analytický model v programu Matlab vycházející z rovnic daných v první části práce určeny mezní a návrhový tlak za účelem analýzy rozsahu tlaků, které mají být pro měření v laboratoři použity tak, aby tryska byla ucpaná a bylo možné hmotnostní tok vyhodnotit. Vyhodnocení hmotnostního toku probíhalo dvěma způsoby, jednak Coriolisovým průtokoměrem a jednak postupem vyhodnocení tlakové diference vycházejícím z normy ISO 5167-1 a 5167-2. Pro samotnou analýzu výsledků měření bylo nutné zpracovat velké množství dat a pomocí Matlabu sestavit rovnice, ze kterých byl hmotnostní tok vyhodnocen.

Závěrečné vyhodnocení ukázalo, jak se měření v praxi blížilo teoretickému analytickému modelu.

Jako návaznost na tuto práci se nabízí vyhodnocení hmotnostních toků pro trysky 2,34mm a 2,54mm, které má Katedra energetických zařízení k dispozici. Pro zlepšení přesnosti měření by bylo vhodné umístit snímače tlaku na potrubí pomocí šroubení a zamezit tak drobným tlakovým ztrátám majících vliv na přesnost výsledků.

## Použitá literatura

1. DVOŘÁK, Václav, 2009. *Úvod do proudění stlačitelných tekutin*. Liberec: Technická univerzita v Liberci. ISBN 978-80-7372-458-0.
2. VESTFÁLOVÁ, Magda a STŘEDA, Ivo, 2004. *Technická dynamika plynů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci. ISBN 8070838019.
3. DVOŘÁK, Václav, 2009. *Proudění v tryskách a difuzorech*. Liberec: Technická univerzita v Liberci. ISBN 978-80-7372-457-3.
4. HENNLICH s.r.o. - *dodavatel kvalitních komponent pro průmysl*, 2023. Online. Dostupné z: <https://www.hennlich.cz/>. [cit. 2024-01-02].
5. KADLEC, Karel, 2013. Ultrazvukové průtokoměry – princip, vlastnosti a použití. Online. [https://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf\\_articles/10538.pdf](https://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/10538.pdf). Roč. 2013, č. 7, s. 14-17. Dostupné: [https://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf\\_articles/10538.pdf](https://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/10538.pdf) [cit. 2024-01-07].
6. KADLEC, Karel, 2016. Plováčkové průtokoměry – průtokoměry s proměnlivým průřezem. Online. *Automa*. Roč. 2016, č. 10, s. 12-15. ISSN 1210-9592. Dostupné z: [https://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf\\_articles/9085.pdf](https://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/9085.pdf). [cit. 2024-01-02].
7. KREJČÍ, Martin, 2014. *Konstrukce Coriolisova průtokoměru*. Diplomová práce, vedoucí Jiří Dvořáček. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.
8. Anon.,[s.a.]. *ProlineProwirl R 200/ 7R2B.*, Online. Dostupné z: <https://www.cz.endress.com/cs/Polni-instrumentace-sita-na-miru/mereni-prutoku/Virovy-prutokomer-Prowirl-R-200-7R2B>. [citováno 2024-01-07].
9. ČSN EN ISO 5167-1: Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku.- Část 1., Clony, dýzy a Venturiho trubice. Praha: Český normalizační institut, 1993
10. ČSN EN ISO 5167-2:2003 Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu- Část 2:Clony. Praha: Český normalizační institut,2003
11. *Testo 0632 1535 IAQ Probe, CO2, Temperature & Humidity*, 2023. Online. TESTO-DIRECT.CA. Dostupné z: <https://www.testo-direct.ca/product/testo-0632-1535-iaq-probe-co2-temperature-humidity>. [cit. 2024-01-02].

12. *GE LP 1000 Series Druck Ultra Low Pressure Sensor*, ©2015-2022. Online. ASICEDIRECT - A&S AUTOMATION.,LTD. Dostupné z: <http://www.asicedirect.com/ge-lp-1000-series-druck-ultra-low-pressure-sensor.html>. [cit. 2024-01-02].
13. *SIEMENS SITRANS F C MASS 6000 IP67 COMPACT/ REMOTE TRANSMITTER*, 2024. Online. PROCESS INSTRUMENT SOLUTIONS. Dostupné z: <http://www.asicedirect.com/ge-lp-1000-series-druck-ultra-low-pressure-sensor.html>. [cit. 2024-01-02].
14. *SIEMENS SITRANS F C MASS 6000 IP67 COMPACT/ REMOTE TRANSMITTER*. *Process Instruments Solutions* [online]. 2024 [cit. 2024-01-07]. Dostupné z: <https://www.processinstrumentsolutions.co.uk/product/siemens-mass-6000-ip67-compact-remote/>
15. *Testo 435-1 - Multifunktions-Klimamessgerät*, 2024. Online. TESTO.COM. Dostupné z: <https://www.testo.com/de-DE/testo-435-1/p/0560-4351>. [cit. 2024-01-02].

## Seznam příloh

Příloha 1 Skript pro výpočet času měření .....	49
Příloha 2 Skript pro výpočet dle Fliegnerova vztahu .....	50
Příloha 3 Skript pro výpočet Machova čísla .....	51
Příloha 4 Skript pro iterační výpočet hmotnostního toku .....	52



## ***Příloha 1 Skript pro výpočet času měření***

```
clear

d=(2.12)*(10^-3); %[mm] %průřez hrdla trysky

kappa=1.4; %Poissonova konstanta

T0=298.15; %[K] %klidová teplota

r=287; % %[J/kg*K] %měrná plynová konstanta

P0= 600*10^3; %[Pa] %tlak nastavený na škrticím ventilu pro měření

P01=10^6; %[Pa] %tlak uvnitř vzdušníku

V= 4; %[m^3] %objem vzdušníku

psimax=((kappa/2)*((2/(kappa+1)))^((kappa+1)/(kappa-1)))^(0.5); %[-] %průtokový součinitel

Akr=(pi*(d^2))/4; %[m^2] %kritický průřez trysky

B=(Akr*psimax*(2/(r*T0))^0.5*(((r*T0)/V))); %konstanta

fprintf("MAX measure time in minutes")

t=-1*(log(P0/P01))/(Akr*psimax*(2/(r*T0))^0.5*(((r*T0)/V)))/60 %čas(min) za který se vyprázdní vzdušníky
```

## *Příloha 2 Skript pro výpočet dle Fliegnerova vztahu*

```
clc
clear

T0=295 % [K];klidovateplota

kappa=1.4 %

p0=250000 % [Pa]

r=287 %r=287;mernaplynovakonstanta [J/Kg*K]

D=0.006 % [m]zadavame prume

Akr=(pi*D^2)/4 % [m^2]r

ro=p0/(r*T0) % [kg/m3];(klidovahustota)=Po(klidovytlak)/(r*T0(klidovateplota))

pb=316968% [Pa] (protitlak)

%% Fliegneruvvztah

psi=((kappa/(kappa-1))*(((pb/p0)^(2/kappa))-(pb/p0)^((kappa+1)/kappa)))^(0.5)

psimax=((kappa/2)*((2/(kappa+1)))^((kappa+1)/(kappa-1)))^0.5

mt=Akr*p0*((2/(r*T0))^0.5)*psimax % po(klidovytlak) To(klidovateplota)
```

### *Příloha 3 Skript pro výpočet Machova čísla*

```
clc
clear

kappa=1.4;

D=0.003;%[m]

Dkr=0.00212; %[m]

A=(pi*D^2)/4; %[m^2]

Akr=(pi*Dkr^2)/4; %[m^2]

X=A/Akr; %pomer vystupniho a kritickeho prurezu

f=@(M)((1/M)*((2/(kappa+1))*1+(((kappa-1)/2)*M^2))^(kappa+1)/(2*(kappa-1))))-(X); %dynamická funkce pro výpočet Machova
čísla iterací

Mnavrhove=fzero(f,2); %navrhove číslo

Mmezni=fzero(f,0.5); %mezni číslo

patm=96790;

P01=500000; %abs. tlak před tryskou [Pa]

p0=P01+patm;

pmezni=p0*(1+((kappa-1)/2)*(Mmezni^2))^(kappa/(1-kappa)); %[Pa]

pnavrhovy=p0*(1+((kappa-1)/2)*(Mnavrhove^2))^(kappa/(1-kappa)); %[Pa]

fprintf("navrhovy tlak je %6.3f Pa\n\n\n",pnavrhovy)

fprintf("mezni tlak je %6.3f Pa\n\n\n",pmezni)
```

#### ***Příloha 4 Skript pro iterační výpočet hmotnostního toku***

```
clc
clear

e=0.9887 %souč.expanze

d=(32*10^-3)%m průměr otvoru ve cloně

rozdiltlaku=51.8

ro1= 1.18 %kg/m^3 hutota Suchého vzduchu při teplotě 24°C

mi=(1.83)*(10^-5) %dyn viskozita při teplotě 24°C

D= 72.1*(10^-3) %vnitřní průměr potrubí

betta=d/D;

C=zeros(20,1);

qm=zeros(20,1);

Re=zeros(20,1);

C1=0.5961;

qm1=((C1*e*(pi/4)*(d^2))*((1-(betta^4))^-0.5))*((2*rozdiltlaku*ro1)^(0.5))*10^3

Re1=(4*qm1)/(3.14*D*mi);

%iterace;

Ci=0.5961 + (0.0261*(betta)^2) - (0.216*(betta)^8) + ...

(0.000521*(((1000000*betta)/Re1)^0.7) + ((0.0188 + ...

0.0063*(19000*betta/Re1)^0.8)*(betta^3.5)*((1000000/Re1)^0.3));

qmi=(Ci*e*(pi/4)*(d^2))*((1-(betta^4))^-0.5))*((2*rozdiltlaku*ro1)^(0.5));

Rei = 4*qmi/(pi*D*mi);
```