

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ V PRAZE

---

Fakulta elektrotechnická

Katedra měření



---

## Diplomová práce

Zhodnocení přesností průtokoměrů při měření  
vícefázových směsí

---

Autor:  
Bc. Michal Hájek

Vedoucí práce:  
doc. Ing. Antonín Platil, Ph.D.

Praha, Květen 2019



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hájek** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **425032**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra měření**  
Studijní program: **Inteligentní budovy**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Zhodnocení přesností průtokoměrů při měření vícefázových směsí**

Název diplomové práce anglicky:

**Evaluation of flowmeters accuracies for measurement of multi-phase mixtures**

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte porovnání různých měřicích principů průtoku pro vícefázové směsi (kapalina + vzduch + pevné částice) z různých oblastí průmyslu.
2. Charakterizujte chování jednotlivých měřicích principů v reakci na různé nehomogenity měřeného média a navrhňte způsob detekce a případně i korekce chyb zpracováním výstupních signálů průtokoměrů.
3. Realizujte sběr a záznam dat ze všech přístrojů a vzdálenou regulaci průtoku kapaliny a vzduchu. Proveďte základní zkoušky funkčnosti komunikace a regulace.
4. Upravte funkční model pro praktické použití ve výukové laboratoři.
5. Sestavte laboratorní úlohu měření vícefázových směsí pro studenty magisterského studia.

Seznam doporučené literatury:

- [1] S.Đađo, M.Kreidl: Senzory a měřicí obvody, Vydavatelství ČVUT, Praha 1999.  
[2] S.Đađo, L. Bejček, A. Platil: Měření průtoku a výšky hladin, 1. vydání, Praha, BEN – technická literatura, 2005. 448 s. ISBN 80-7300-156-X.  
[3] Dokumentace průtokoměrů firmy Endress+Hauser, případně dalších.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**doc. Ing. Antonín Platil, Ph.D., katedra měření FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:


Datum zadání diplomové práce: **05.02.2019**

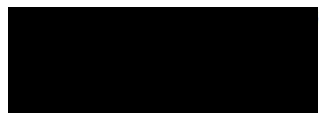
Termín odevzdání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání diplomové práce:

**do konce letního semestru 2019/2020**

  
doc. Ing. Antonín Platil, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


  
prof. Ing. Pavel Řípka, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

11.3.2019

Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta



## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 20.5.2019

.....  
Michal Hájek



## Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu doc. Ing. Antonínu Platilovi, Ph.D. za čas a rady při vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě „Endress+Hauser“ za zapůjčení měřicích přístrojů, firmě „Procter & Gamble“ za dodání testovacích látek z oblasti drogistického zboží a firmě „Bidfood“ za dodání potravin. Bez těchto látek by se tato práce nemohla uskutečnit. Nakonec bych chtěl poděkovat katedře měření fakulty elektrotechnické za zapůjčení prostor a proplacení nákladů.





## Anotace

Tato práce se zabývá přesností měření jednotlivých typů průtokoměrů v závislosti na obsahu vícefázové směsi různého složení. V úvodní části je čtenář seznámen se základními pojmy k tématu měření průtoku. Dále jsou popsány použité průtokoměry. Praktická část je věnována vytvoření měřicí aplikace, díky které bylo realizováno určení vlivu příměsí na měření. Na základě různých použitých směsí bylo určeno chování jednotlivých průtokoměrů v závislosti na druhu nehomogenity. Výsledky budou využity pro návrh metod detekce přítomnosti příměsí a korekce výsledku měření. V závěru byl testovací model upraven a byla vytvořena výuková laboratorní úloha. To umožní studentům pochopit téma měření vícefázového průtoku.

## Klíčová slova

Průtokoměr, Vícefázový průtok, Směs, Nehomogenity, Viskozita, Hustota, Pěna, Model

## Annotation

This work deals with measurement accuracy of various types of flowmeters in relation to presence of multiphase mixtures with different composition. In the introductory part the reader is introduced to the basic concepts of the flow measurement. Then the used flowmeters are described. The practical part is dedicated to development of measuring application, which is used to determine the influence of multiphase mixtures on the measurement. Based on the various mixtures used, the behaviour of individual flowmeters is determined according to the type of inhomogeneity.

The results will be used for design of methods of inhomogeneity detection and measurement result correction. Finally, the measuring model is modified for educational purpose and laboratory assignment is created. This shall help students to understand the topic of multiphase flow measurement.

## Keywords

Flowmeter, Multiphase flow, Mixture, Inhomogeneity, Viscosity, Density, Foam, Model

## Obsah

1. Úvod .....	1
2. Cíl práce .....	2
3. Základní teoretické pojmy .....	3
3.1. Průtok .....	3
3.2. Měrná hmotnost .....	4
3.3. Viskozita.....	4
3.4. Nenevtonovská tekutina .....	5
3.5. Reynoldsovo číslo .....	5
3.6. Proudění .....	5
3.6.1. Laminární proudění .....	6
3.6.2. Turbulentní proudění .....	6
3.7. Bernoulliho rovnice .....	6
3.8. Rovnice kontinuity.....	8
3.9. Teplotní roztažnost.....	9
3.10. Měrná tepelná kapacita .....	10
3.11. Hydrostatický tlak.....	10
3.12. Vícefázový průtok.....	11
3.13. Kavitace .....	12
4. Použité průtokoměry.....	13
4.1. Coriolisův průtokoměr.....	13
4.2. Termické průtokoměry.....	14
4.2.1. Termoanemometr .....	15
4.2.2. Kalorimetr.....	15
4.3. Ultrazvukové průtokoměry .....	16
4.3.1. S vyhodnocením doby průchodu.....	16
4.3.2. Dopplerovské.....	18
4.3.3. Uchycení na potrubí .....	19
4.3.3.1. Příložné senzory.....	19
4.3.3.2. Zásuvné senzory .....	19
4.4. Magneticko-indukční průtokoměr .....	20
4.5. Vírový průtokoměr .....	21
5. Praktická část.....	23
5.1. Vytvoření aplikace a hardwaru.....	23
5.1.1. Měřicí část .....	23
5.1.2. Regulační část.....	26

5.2.	Testování látek .....	28
5.2.1.	Získané znalosti o chování z bakalářské práce .....	29
5.2.2.	Písek křemičitý bílý .....	31
5.2.3.	Hydroxid vápenatý .....	33
5.2.4.	Kaolín .....	35
5.2.5.	Mléko .....	37
5.2.6.	Ovocný sirup .....	39
5.2.7.	Směs na zmrzliny .....	41
5.2.8.	Lenor SOMMERBRISE .....	43
5.2.9.	Lenor HYPOALERGEN .....	45
5.2.10.	Jar ultra + Jar sensitive .....	47
5.3.	Finální porovnání průtokoměrů .....	48
	Coriolisův průtokoměr .....	48
	Vírový průtokoměr .....	49
	Magneticko-indukční průtokoměr .....	49
	Termický průtokoměr .....	50
5.4.	Návrh detekce a korekce chyb .....	50
5.5.	Přestavění modelu pro studenty .....	52
5.5.1.	Varianta A .....	52
5.5.2.	Varianta B .....	53
5.6.	Návrh laboratorní úlohy .....	54
6.	Závěr .....	55
7.	Zdroje .....	56
	Seznam příloh .....	58

## Seznam Grafů

Graf 1: Odchýlení měření v případě různého poměrného objemu vzduchu, Referenční průtok 1 m <sup>3</sup> /h čistá voda, 0,6m <sup>3</sup> /h s příměsí vzduchu (Hájek, 2017).....	29
Graf 2: Odchýlení měření při přidání písku a vzduchu (poměr objemů voda:vzduch:písek) Referenční průtok 1,23m <sup>3</sup> /h samotná směs bez vzduchu, 0,6m <sup>3</sup> /h průtok směsi + příměs 0,06m <sup>3</sup> /h vzduchu	31
Graf 3: Odchýlení měření při přidání hašeného vápna a vzduchu (poměr objemu voda:vzduch:vápno) Referenční průtok 1,18m <sup>3</sup> /h čistá směs bez vzduchu, 0,6m <sup>3</sup> /h průtok směsi + příměs 0,06m <sup>3</sup> /h vzduchu .....	33
Graf 4: Odchýlení měření při přidání jílu a vzduchu (poměr objemu voda:vzduch:jíl) Referenční průtok 1,07m <sup>3</sup> /h samotná směs bez vzduchu, 0,6m <sup>3</sup> /h průtok směsi + příměs 0,06m <sup>3</sup> /h vzduchu.....	35
Graf 5: Odchýlen v případě měření mléka a vzduchu (poměr objemu mléko:vzduch) Referenční průtok 1,26m <sup>3</sup> /h čistá kapalina bez vzduchu, 0,6m <sup>3</sup> /h průtok kapaliny + příměs 0,06m <sup>3</sup> /h vzduchu .....	37
Graf 6: Odchýlen v případě měření ovocného sirupu a vzduchu (poměr objemu sirup:vzduch), Referenční průtok 1,26m <sup>3</sup> /h čistá kapalina bez vzduchu, 0,6m <sup>3</sup> /h průtok kapaliny + příměs 0,06m <sup>3</sup> /h nebo 6l/h vzduchu.....	39
Graf 7: Odchýlen v případě měření směsi na zmrzliny a vzduchu (poměr objemu zmrzlinová směs:vzduch), Referenční průtok 1,18m <sup>3</sup> /h samotná směs bez vzduchu, 0,6m <sup>3</sup> /h průtok směsi + příměs 0,06m <sup>3</sup> /h nebo 6l/h vzduchu .....	41
Graf 8: Odchýlení v případě měření Lenoru SOMMERBRISE a vzduchu (poměr objemu Lenor:vzduch), Referenční průtok 1,26m <sup>3</sup> /h čistá kapalina bez vzduchu, 0,6m <sup>3</sup> /h průtok kapaliny + příměs 0,06m <sup>3</sup> /h nebo 6l/h vzduchu.....	43
Graf 9: Odchýlen v případě měření Lenoru HYPOALERGEN a vzduchu (poměr objemu Lenor:vzduch), Referenční průtok 1,26m <sup>3</sup> /h čistá kapalina bez vzduchu, 0,6m <sup>3</sup> /h průtok kapaliny + příměs 0,06m <sup>3</sup> /h nebo 6l/h vzduchu.....	45
Graf 10: Odchýlení v případě vzduchových bublin v jaru (poměr objemu jar:vzduch), Referenční průtok 0,024m <sup>3</sup> /h.....	47

## Seznam Tabulek

Tabulka 1: Maximální možná chyba přístroje specifikovaná výrobcem.....	30
Tabulka 2: Součinitele tepelné vodivosti pro jednotlivé látky .....	32
Tabulka 3: Rozpustnost hydroxidu vápenatého na základě teploty .....	33
Tabulka 4: Obsah jednotlivých látek podle druhu mléka .....	37

## Seznam obrázků:

Obrázek 3.1.1: Pohyb označeného objemu kapaliny (Barták,2010) .....	3
Obrázek 3.3.1: Koncept viskozity (E+H,2006).....	4
Obrázek 3.6.1.1:Laminární proudění (E+H,2006) .....	6
Obrázek 3.6.2.1: Turbulentní proudění (E+H,2006) .....	6
Obrázek 3.7.1: Síly působící na částici tekutiny při pohybu po proudnici (Barták,2010).....	7
Obrázek 3.8.1: Princip rovnice kontinuity, proudění kapaliny při proměnném průřezu (Barták,2010) .	8
Obrázek 3.11.1: Ukázka že hydrostatický tlak je závislý pouze na výšce (Kuphaldt) .....	10
Obrázek 3.12.1: Dvofázový průtok (voda-vzduch) v horizontálním a vertikálním potrubí .....	11
Obrázek 3.13.1: Vznik kavitace na lodním šroubu (Kavitace 2019) .....	12
Obrázek 4.1.1 Účinek Coriolisovy síly.....	14
Obrázek 4.2.1.1: Princip termoanemometru (Kadlec,2015) .....	15
Obrázek 4.2.2.1: Princip kalorimetru (Kadlec,2015) .....	16
Obrázek 4.3.1.1: Princip ultrazvukového průtokoměru s vyhodnocením doby průchodu (VŠCHT) .....	17
Obrázek 4.3.2.1: Princip ultrazvukového průtokoměru na principu Dopplerova jevu, (Kadlec,2015) .	18
Obrázek 4.3.3.1.1: Příložný ultrazvukový senzor (Kadlec,2015) .....	19
Obrázek 4.3.3.2.1: Zásuvný ultrazvukový senzor (Kadlec,2015) .....	20
Obrázek 4.4.1: Princip indukčního senzoru (Kadlec,2015).....	20
Obrázek 4.5.1:Vznik vírů na překážce (VŠCHT) .....	22
Obrázek 4.5.2: DSC senzor (Kadlec, 2015).....	22
Obrázek 5.1.1.1: Schématické zapojení převodu signálu .....	23
Obrázek 5.1.1.2: Blokové schéma měřicího programu .....	23
Obrázek 5.1.1.3: Nastavení základních vlastností průtokoměrů.....	24
Obrázek 5.1.1.4: Nastavení a vytvoření ukládacího souboru.....	24
Obrázek 5.1.1.5: Ovládací část finální aplikace .....	25
Obrázek 5.1.1.6: Měřicí část finální aplikace.....	26
Obrázek 5.1.1.7: Ovládací panel aplikace.....	26
Obrázek 5.1.2.1: Aplikace pro regulaci průtoku .....	27
Obrázek 5.1.2.2: Hrubé schématické zapojení regulace .....	27
Obrázek 5.2.1: Schéma zapojení modelu 1)zásobní nádoba s ponorným čerpadlem, 2)vzduchové čerpadlo, 3)rotametr 4)Ultrazvukový, 5)Vírový, 6)Termický, 7)Magneticko-indukční, 8)Coriolisův	29
Obrázek 5.2.6.1 Ukotvení termického průtokoměru (t-mass T150) .....	40
Obrázek 5.2.7.1: Ukázka napěněné kapaliny .....	42
Obrázek 5.4.1: Diagram detekce a korekce nehomogenit .....	51
Obrázek 5.5.1.1: Varianta A pro přestavení modelu 1) Ultrazvukový; 2) Termický; 3) Vírový; 4) Coriolisův; 5) Magneticko-indukční; červené šipky určují směr toku kapaliny .....	52
Obrázek 5.5.2.1: Varianta B pro přestavení modelu 1) Ultrazvukový; 2) Termický; 3) Coriolisův; 4) Magneticko-indukční; 5) Vírový; červené šipky určují směr toku kapaliny .....	53

## 1. Úvod

Měření průtoku je neodmyslitelnou součástí dnešního průmyslu. Bez správného určení průtoku by dnes nebylo možné vyrábět pro člověka neodmyslitelné zboží. V dřívějších dobách se proteklé množství odměřovalo za pomoci různých odměrek a nádob. S příchodem moderních technologií a masové produkce začal být však tento způsob zastaralý a velice zdlouhavý.

Tato práce se zabývá analýzou přesnosti průtokoměrů v závislosti na měření vícefázové směsi. Průtokoměry jsou přístroje, které velmi rychle a velice přesně dokáží určit průtok tekutin. V průmyslu je využito mnoho měřicích principů. Jednotlivé průtokoměry dokáží velice přesně určit průtok čisté (homogenní) látky. Velký problém ale nastává, pokud se jedná o vícefázovou směs kapaliny a plynu nebo pevných částic. V takovém případě dochází k narušení měření. Narušení měření má neblahý vliv na přesné určení průtoku. Špatně určený průtok v takovém případě vede například ke ztrátám na materiálu při špatném dávkování média. V horších případech může dojít k poškození a úplnému vyřazení výrobků.

Mým cílem je na základě naměřených dat napomoci k řešení problému měření vícefázového průtoku. Včasnou detekcí nehomogenit média a korekcí by bylo možné snížit ztráty na materiálech. K tomu je ale nejdříve nutné ověřit chování přístrojů podle reakce na jednotlivé směsi. Určením chování a korekcí výsledků by poté bylo možné zamezit případným ztrátám.

Na závěr chci seznámit další studenty s touto problematikou. Aby však mohli pochopit daný problém je nutné, aby pochopili vícefázový průtok a jeho měření. Nejlepší metodou k pochopení je vyzkoušet si vliv vícefázových směsí prakticky. Proto je nejlepší volbou sestavit model a připravit laboratorní úlohu. Na základě vlastních měření mohou poté pochopit tento jev.

## 2. Cíl práce

Cílem práce je rozšíření dřívějších měření o další vícefázové směsi. V přechozí bakalářské práci (Hájek, 2017) byl měřen průtok vody s různým poměrným obsahem přimíchané vzduchové složky. Jelikož průtokoměry jsou využívány v různých oblastech průmyslu, jsou nyní tato data doplněna o další druhy látek.

Naměřená data je nutno následně analyzovat a vyhodnotit vliv jednotlivých druhů příměsí na měřicí funkci přístrojů. Analýza výsledků směřuje k návrhu detekce jednotlivých druhů nehomogenit. Tato detekce bude následně použita a otestována ke korekci měření.

Ke snížení časové náročnosti je nutné navrhnout a sestavit systém pro záznam dat ze všech přístrojů (druhů průtokoměrů) najednou. Tímto krokem dojde ke snížení potřebného času měření na jednu pětinu původní hodnoty. Po návrhu záznamníku dat je nutné také upravit regulaci průtoku. Je potřeba více automatizovat tento proces, aby byl realizován za pomoci počítače.

Veškeré úpravy budou poté implementovány při přestavbě modelu pro využití v laboratořích školy. Model může být umístěn na zeď laboratoře pro jeho pozdější využití ve výuce.

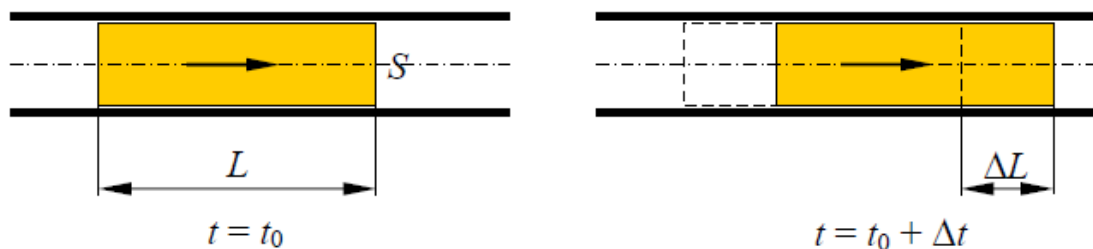
K výslednému modelu bude navržena laboratorní úloha pro studenty. V této úloze budou studenti seznámeni s měřením průtoku kapalin. Tyto experimenty pro měření průtoků budou následně rozšířeny o znalosti měření vícefázových směsí a jejich průtoků.

### 3. Základní teoretické pojmy

#### 3.1. Průtok

Průtok tekutiny skrz potrubí je obvykle sledován v závislosti na jediné prostorové souřadnici, která je měřena podél osy tohoto potrubí. Díky tomu je možné zanedbat změny v kolmých směrech na tuto osu. Ve výsledku se tedy jedná o model jednorozměrného proudění. Tento model je však ve výpočtech dostatečně přesný a poskytuje vyhovující výsledky.

Předpokládejme proudění uvnitř dlouhé vodorovné trubky s neměnným průměrem, přičemž uvažujeme že toto proudění bude stacionární ideální kapaliny (hustota a viskozita jsou nulové). Část objemu této kapaliny bude obarvena a sledována (například průhledným potrubím) v závislosti na čase. Označená část poté vytvoří v potrubí válec o délce  $L$  a průřezu  $S$  rovnému vnitřnímu průměru trubky (Barták, 2010).



Obrázek 3.1.1: Pohyb označeného objemu kapaliny (Barták,2010)

Poté za čas  $\Delta t$  se tento válec posune o vzdálenost  $\Delta L$ . Kolem pozorovaného místa poté proteče objem, který je roven

$$\Delta V = S \cdot \Delta L \quad 3.1-1$$

který bude odpovídat hmotnosti

$$\Delta m = \rho \cdot S \cdot \Delta L \quad 3.1-2$$

$$\Delta m = \rho \cdot S \cdot \frac{\Delta L}{\Delta t} \quad 3.1-3$$

$$\dot{m} = \rho \cdot S \cdot u \quad 3.1-4$$

kde  $u$  udává rychlost, jakou se pohybuje pozorovaný objem.

Kapalina v naší úvaze je nevazká (tj. nebude ulpívat na stěnách trubice) a bude mít stálý průřez  $S$ . Všechny částice kapaliny se proto budou pohybovat stálou rychlostí  $u$ . Při porovnání rovnice 3.1-4 za platnosti předchozích vztahů dostáváme objemový průtok, který je roven součinu průřezu a rychlosti proudění

$$\dot{V} = S \cdot u \quad 3.1-5$$



### 3.2. Měrná hmotnost

Měrná hmotnost, spíše známá pod pojmem hustota je jednou z fyzikálních veličin. Vyjadřuje hmotnost dané látky vztahenou k jejímu objemu.

Hustotu je možné vyjádřit následujícím vztahem

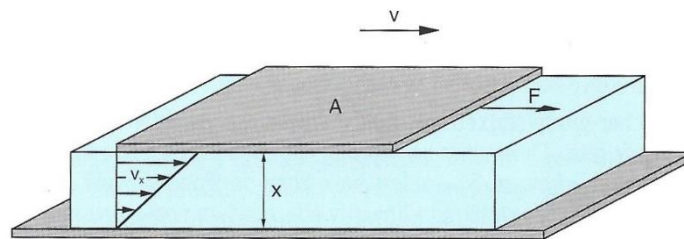
$$\rho = \frac{m}{V} \quad 3.2-1$$

Kde  $m$  je hmotnost daného tělesa

$V$  odpovídá objemu tohoto tělesa

### 3.3. Viskozita

Viskozita je vlastnost tekutin, která udává poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti. Je závislá na vzdálenosti mezi jednotlivými sousedními vrstvami, které se pohybují rozdílnou rychlostí. Smykové napětí vzniká v důsledku vazebních sil mezi molekulami této tekutiny. Při nuceném pohybu jsou vyvolány přidavné vnitřní síly nebo také jinak vnitřní tření (E+H, 2006).



Obrázek 3.3.1: Koncept viskozity (E+H,2006)

Za použití předchozího obrázku je možné určit smykové (tečné) napětí. Vyjádřit toto napětí můžeme následujícím vztahem

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \frac{du}{dx} \quad 3.3-1$$

Kde  $A$  je plocha mezi pohyblivou deskou a tekutinou

$F$  je síla způsobující pohyb desky

$\eta$  je dynamická viskozita

$\frac{du}{dx}$  je gradient rychlosti (rychlost u nepohyblivé spodní stěny je nulová, zatímco těsně pod pohyblivou deskou dosahuje hodnoty rychlosti  $v$ )

Druhým druhem viskozity je tzv. kinematická viskozita. Tuto viskozitu definuje vztah

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad 3.3-2$$

Kde  $\rho$  je hustota dané látky

### 3.4. Neneutronovská tekutina

Na rozdíl od běžných kapalin se neneutronovské kapaliny neřídí ani při laminárním toku Newtonovým zákonem viskozity. U newtonovských kapalin je poměr tečného napětí a rychlostního gradientu konstantní. U neneutronovských závisí viskozita na hodnotě rychlostního gradientu a je označována jako zdánlivá viskozita. Podle jejího průběhu můžeme kapaliny dělit na tři skupiny

- 1) Pseudoplastické a plastické kde viskozita klesá s rostoucím gradientem rychlosti. Patří sem například bláto, kečup a zubní pasta. Speciálním druhem těchto tekutin jsou ještě tzv. Tixotropní látky, kdy s dobou působení klesá viskozita.
- 2) Binghamské vykazují určitou mez toku. To znamená že tečou až od určitého napětí. Mezi tyto látky patří odpadní kaly, roztoky polymerů, nebo suspenze vápna.
- 3) Dilatantní mají zvyšující se viskozitu s rostoucím gradientem rychlosti. Příkladem je například suspenze kukuřičného škrobu. Podskupinou jsou Reopexní tekutiny, kdy viskozita s dobou působení roste. (Deriánová, 2009)

Určení chování jednotlivých neneutronovských tekutin je možné podle následujícího vzorce

$$D = D(\tau) \quad 3.4-1$$

Kde  $D$  je závislost rychlosti deformace

$D(\tau)$  je závislost s ohledem na napětí  $\tau$

### 3.5. Reynoldsovo číslo

Bezrozměrné Reynoldsovo číslo určuje poměr mezi silami v tekutině. Přesněji se jedná o síly setrvačné a třecí. Díky tomuto poměru je možné použít  $Re$  jakožto kritérium pro posuzování druhu proudění.

$$Re_{DN} = \frac{\text{setrvačné síly}}{\text{třecí síly}} \quad 3.5-1$$

$$Re_{DN} = \frac{\rho u^2 DN}{\eta u} \quad 3.5-2$$

$$Re_{DN} = \frac{\rho u DN}{\eta} \quad 3.5-3$$

$$Re_{DN} = \frac{u DN}{\nu} \quad 3.5-4$$

Kde  $\eta$  je dynamická viskozita tekutiny

$u$  je rychlost proudění

$DN$  je charakteristický rozměr potrubí

$\nu$  je kinematická viskozita tekutiny (Ďaďo, 2005)

### 3.6. Proudění

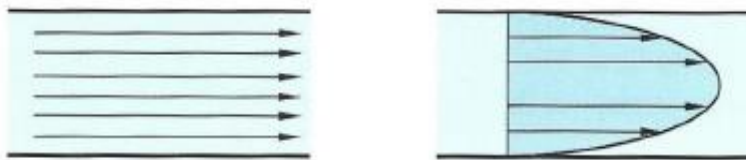
Pod významem proudění si můžeme představit takový pohyb tekutin, kdy u částic převažuje pohyb v jednom směru. Pohyb tekutin je k vyjádření a výpočtům složitější než pohyb pevných látek. Jednotlivé částice tekutiny mohou měnit vzájemnou polohu. Každá z těchto částic má svou určitou rychlost  $u$  a její velikost se může měnit v závislosti na místě a čase. Podle této rychlosti můžeme rozlišovat dva druhy proudění

- 1) Laminární (ustálené), kdy je rychlost částic stálá
- 2) Turbulentní, kdy dochází ke změně rychlosti částic a tím ke tvorbě vírů

Trajektorii jednotlivých částic znázorňujeme za pomoci proudnic. Jedná se o myšlenou čáru, jejíž tečna má v libovolném bodě směr rychlosti  $u$  této částice.

### 3.6.1. Laminární proudění

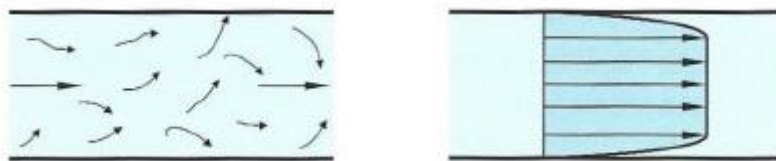
Laminární proudění je typické pro tekutiny s vysokou viskozitou a malé rychlosti proudění. Převládá zde vliv třecích sil mezi vrstvami, které se mezi sebou navzájem nemíchají. Jelikož se jednotlivé dráhy mezi sebou nekříží je rychlost rozdělena parabolicky. Nejvyšší rychlosti dosahuje tekutina v ose potrubí, a naopak nejmenší v místě styku se stěnou potrubí. V tomto místě totiž dochází dle očekávání k největšímu působení třecích sil. Jak již bylo zmíněno, výsledný profil má tvar rotačního osově souměrného paraboloidu (tzv. úplně vyvinutý rychlostní profil).



Obrázek 3.6.1.1: Laminární proudění (E+H, 2006)

### 3.6.2. Turbulentní proudění

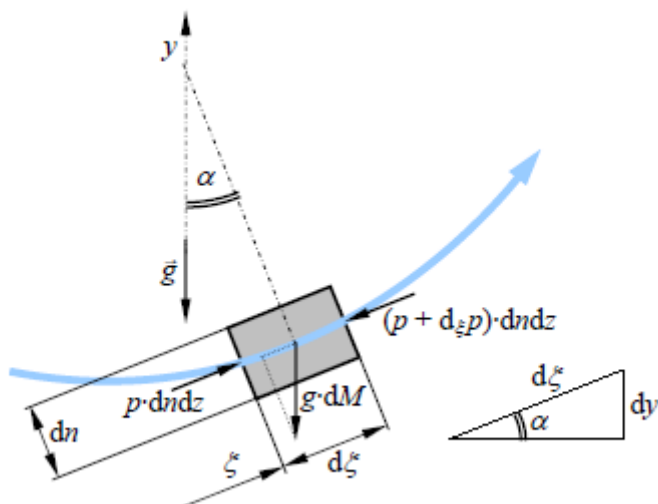
Turbulentní proudění se vyskytuje převážně u vysokých rychlostí proudění a tekutin s nižší viskozitou. K jeho vzniku také dochází v místech míchání dvou nezávislých toků. Jednotlivé dráhy se mezi sebou kříží a tím dochází k tvorbě vírů. Tyto víry však nepřispívají k samotnému průtoku. Pokud by byl požadavek ke zrychlení průtoku je nutné zvýšit tlak v soustavě (potrubí). Na rozdíl od laminárního proudění zde převládá vliv setrvačných sil. Tekutina protéká ve většině průřezu totožně. Rychlostní profil je poté převážně plochý.



Obrázek 3.6.2.1: Turbulentní proudění (E+H, 2006)

## 3.7. Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice je projevem druhého Newtonova zákona v případě jednorozměrného proudění. Při stacionárním proudění se částice tekutiny pohybují po proudnicích (vektorové čáry rychlostního pole). Rychlost těchto částic má k proudnici vždy tečný směr. Princip Bernoulliho rovnice je možné vyjádřit za pomoci následujícího obrázku.



Obrázek 3.7.1: Síly působící na částici tekutiny při pohybu po proudnici (Barták,2010)

U ideální neviské tekutiny (viskozita rovna nule) se mohou projevit v případě povrchových sil pouze síly tlakové. Z vnějších sil je nutno uvažovat sílu vyvolanou gravitačním polem Země (gravitační zrychlení  $\vec{g}$ ). Změna rychlosti se projevuje jen v závislosti na poloze měřené podél proudnice  $\xi$  (Barták, 2010) .

Druhý Newtonův zákon říká: „Jestliže na těleso působí síla, pak se těleso pohybuje se zrychlením, které je přímo úměrné působící síle a nepřímo úměrné hmotnosti tělesa“. Dá se tedy základní vztah vyjádřit následovně.

$$a_{\xi} \cdot dm = \sum_j dF_{j\xi} \quad 3.7-1$$

Kde  $a_{\xi}$  je zrychlení

$dm$  je hmotnost částice

$\sum_j dF_{j\xi}$  je suma sil působících na částici

Při vyjádření jednotlivých složek, kdy je známo, že rychlost se mění v závislosti na poloze může být napsáno

$$a_{\xi} = \frac{\partial u}{\partial \xi} \frac{d\xi}{dt} = u \frac{\partial u}{\partial \xi} \quad 3.7-2$$

U tlakových sil při uvažování směru po proudnici je vyjádření

$$dF_{p\xi} = -\frac{\partial p}{\partial \xi} d\xi \cdot dndz = -\frac{\partial p}{\partial \xi} dV \quad 3.7-3$$

Dále je nutné uvážit, že po celou dobu na částici působí gravitační síla

$$dF_{g\xi} = -g \sin \alpha \cdot dm = -g \sin \alpha \cdot \rho dV \quad 3.7-4$$

Pokud všechny předchozí rovnice dosadíme do původního vztahu 3.7-1 dostaneme

$$u \frac{\partial u}{\partial \xi} \rho dV = - \frac{\partial p}{\partial \xi} dV - g \sin \alpha \cdot \rho dV \quad 3.7-5$$

Jediné důležité změny jsou podél proudnice. Z tohoto důvodu můžeme provést několik matematických operací (vydělení  $dV$ , užití pomocného pravoúhlého trojúhelníku, vynásobení  $d\xi$  a vydělení hustotou) čímž dostaneme diferenciální tvar Bernoulliho rovnice.

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2} u_1^2 + g y_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2} u_2^2 + g y_2 = konst \quad 3.7-6$$

Poslední rovnice v integrálním tvaru vyjadřuje zachování mechanické energie pro částice tekutiny. Pouze dochází k přerozdělení do tří forem

- 1) Měrné práci tlakových sil  $p/\rho$
- 2) Měrné práci tíhových sil  $gy$
- 3) Měrné kinetické energii  $u^2/2$

V případě, že celá rovnice bude vynásobena hustotou bude rovnice v tzv. rozměru tlaků

$$p + \frac{1}{2} \rho u^2 + \rho gh = konst. \quad 3.7-7$$

Kde zleva doprava reprezentují jednotlivé členy

- 1) Statický tlak  $p$
- 2) Dynamický (kinetický ve stlačitelné tekutině) tlak  $\frac{1}{2} \rho u^2$
- 3) Polohový tlak  $\rho gh$  (při proudění ve vodorovném směru nedochází ke změně vertikální polohy, a tak je tento člen v takovém případě vypuštěn z rovnice)

### 3.8. Rovnice kontinuity

Při vyjádření rovnice kontinuity je nutné vědět, zda se jedná o stlačitelnou či nestlačitelnou tekutinu. Jak již bylo řečeno, proudění je dáno součinem průřezu potrubí a rychlosti. Za ustáleného proudění, kdy je hustota konstantní a dochází ke změně průřezu, může být objemový průtok vyjádřen následovně.

$$\dot{V}_1 = u_1 \cdot S_1 \quad 3.8-1$$



Obrázek 3.8.1: Princip rovnice kontinuity, proudění kapaliny při proměnném průřezu (Barták, 2010)

V oblasti mezi body 1,2 a nepropustnými stěnami potrubí nedochází k žádnému úniku kapaliny. Kapalina je nestlačitelná, a proto nedochází ke změně její hustoty. Z toho plyne, že co do potrubí vteče v bodě 1, musí také vytéct v bodě 2.

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_2 = \dot{V} = konst \quad 3.8-2$$

Pokud je proudění stacionární, v každé poloze podél osy potrubí přísluší každému průřezu konstantní rychlost. To znamená že v místě s menším průřezem bude větší rychlost a naopak. Diferenciální vyjádření tohoto vztahu následně je

$$\dot{V} = konst \Rightarrow d\dot{V} = 0 \quad 3.8-3$$

V případě, že je proudění nestacionární je objemový průtok závislý na čase. Rovnice kontinuity je v tomto případě obdobná (má podobný formální tvar). Jediným rozdílem je ovšem že rychlost je závislá na čase (průřezy se mění v čase). V daném okamžiku bude tedy průtok roven ve všech místech a bude mít rovnici

$$u_1(t) \cdot S_1 = u_2(t) \cdot S_2 \quad 3.8-4$$

### 3.9. Teplotní roztažnost

Teplotní roztažnost je jev kdy tekutina mění svůj objem a hustotu v důsledku změny teploty. U většiny látek roste objem se zvětšující se teplotou. Různé tekutiny se roztahují za stejných podmínek různě. Bude-li na tekutinu působit stálý vnější tlak, může být tento stav vyjádřen následovně:

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta t \quad 3.9-1$$

Pokud by se tento vztah rozepsal, dá se změna objemu zapsat následovně

$$V(t) = V_0 + \Delta V = V_0(1 + \beta \Delta t) \quad 3.9-2$$

Kde  $V_0$  je objem tělesa při pevně zvolené referenční teplotě

$t_0$  je tato zvolená referenční teplota (v praxi 0°C nebo 20°C)

Nutno podotknout, že předchozí vztah platí pouze při malých změnách teploty. Při velkých změnách je nutno vyjádřit objem v závislosti na teplotní změně složitěji:

$$V(t) = V_0 + \Delta V = V_0(1 + \beta_1 \Delta t + \beta_2 (\Delta t)^2) \quad 3.9-3$$

Tím, že dochází ke změně objemu, dochází také ke změně hustoty. Jestliže je známa  $\rho_0$  (hustota látky při počáteční teplotě), může být změna hustoty vyjádřena přibližně

$$\rho \approx \rho_0(1 - \beta \Delta t) \quad 3.9-4$$

### 3.10. Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita udává, jakou tepelnou kapacitu má kilogram určité látky. Oproti tepelné kapacitě uvažuje taktéž hmotnost těles. Byla zavedena, aby byly zohledněny rozdíly v hmotnosti těles při výpočtech. Definuje kolik tepla je nutné dodat látce o hmotnosti  $1\text{kg}$ , aby se její teplota zvýšila o  $1\text{K}$ .

$$c_p = \frac{Q}{m\Delta T} = \frac{C}{m} \quad 3.10-1$$

Kde  $Q$  je dodaná energie (teplo)

$\Delta T$  je změna teploty

$C$  je tepelná kapacita

$c_p$  je měrná tepelná kapacita

### 3.11. Hydrostatický tlak

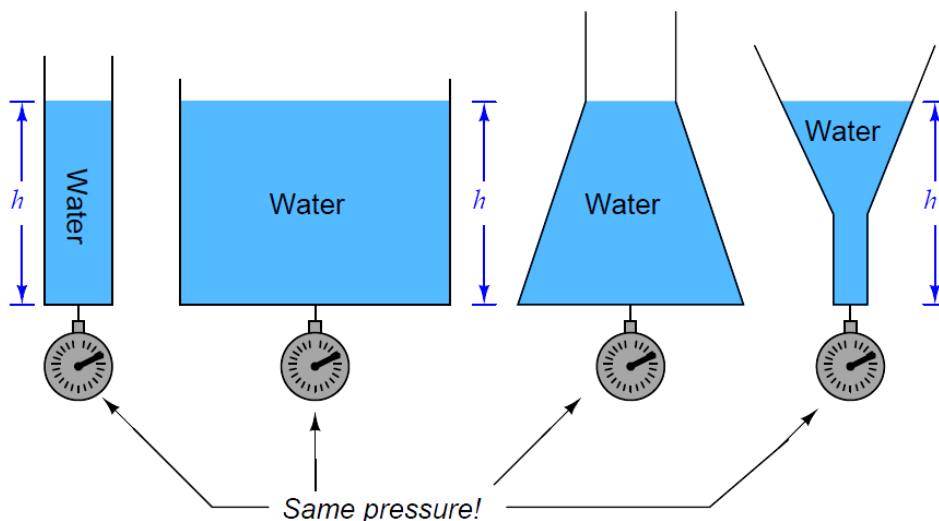
V případě, že je daná soustava v klidu a je na ní vyvíjen nenulový součet gravitační a setrvačné síly, působí na kapalinu hydrostatický tlak. Tímto tlakem dochází k tlačení kapaliny na všechny tělesa ponořená dovnitř. Také působí na stěny nádoby, nebo vlastní části (výše položené části působí na ostatní části položené ve vrstvách pod). V případě matematického vyjádření se dá hydrostatický tlak definovat následovně.

$$p_h = h\rho g \quad 3.11-1$$

Kde  $h$  je hloubka

$g$  je gravitační konstanta

$\rho$  je hustota kapaliny

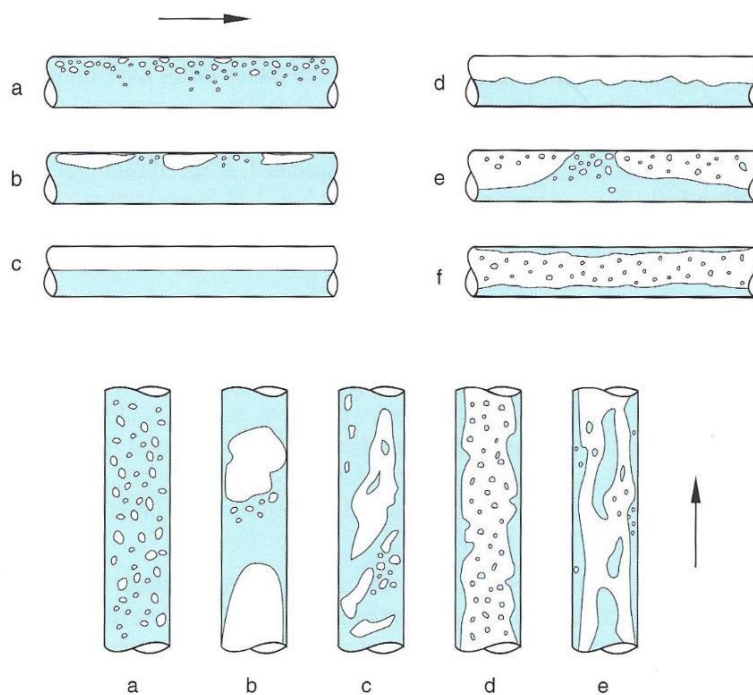


Obrázek 3.11.1: Ukázka že hydrostatický tlak je závislý pouze na výšce (Kuphaldt)

### 3.12. Vícefázový průtok

Ustálený průtok směsi látek s odlišným skupenstvím (kapaliny, plyny, pevné částice) nebo s odlišnými fyzikálními vlastnostmi při stejném skupenství (voda a olej) můžeme nazvat vícefázovým průtokem. Jelikož každá látka ve směsi má jiné fyzikální vlastnosti, dochází při měření vícefázových médií k nepřesnostem měření. Stejný problém nastává, pokud přístroj konfigurovaný na určitou látku měří látku odlišnou.

V mnohých případech v praxi se často počítá s dvoufázovým průtokem. Obvyklé spojení je kapalina s určitou příměsí vzduchové složky. Vzduch v uzavřeném potrubí nemá kam uniknout, a proto se přepravuje dohromady s proudící kapalinou. S ohledem na množství vzduchu a rychlost proudění dochází k tvoření určitých druhů vícefázového průtoku. V případě dostatečného průtoku dochází k přijatelnému promíchání některých látek. Látky „mísitelné“ (angl. „miscible“, např. voda a líh) tvoří homogenní směs a v praxi nebývá takový problém je měřit. Opakem jsou látky „nemísitelné“ (angl. „immiscible“, např. voda a olej). Jelikož promíchání těchto látek není dostatečné, jednotlivé složky se mohou zejména při nízkém průtoku oddělit a dochází k větším chybám měření. (E+H,2006)



Obrázek 3.12.1: Dvoufázový průtok (voda-vzduch) v horizontálním a vertikálním potrubí

Horizontálně: a) bubliny, b) kapsy, c) vrstvy, d) zvlněné rozhraní, e) olejové skvrny, f) prstence

Vertikálně: a) bubliny, b) kapsy nebo olejové skvrny, c) stlačený vzduch, d) prstence e) jemné prstence (E+H,2006)



### 3.13. Kavítace

Kavítace je náhlý vznik plynu v kapalině. Příčinou je náhlý pokles tlaku v proudící kapalině. V případě proudění v potrubí je tento jev doprovázen vznikem bublin plynu, který byl v kapalině rozpuštěn. U průtokoměrů může kavítace vzniknout u kapalin s velkým obsahem vzduchu. Náhlý pokles tlaku (například náhlá změna průřezu) způsobí vznik těchto dutin, které mohou následně kolabovat. Kavítace se projevuje také zvýšeným ohřevem kapaliny, vibracemi, zvukem a poškozením materiálu tam, kde dochází k zániku bublin. Do dnešního dne nebyl objeven materiál, který by byl odolný vůči případné kavitační erozi. (Ďaďo,2005)



Obrázek 3.13.1: Vznik kavítace na lodním šroubu (Kavítace 2019)

## 4. Použité průtokoměry

### 4.1. Coriolisův průtokoměr

Coriolisovy průtokoměry patří v dnešní době mezi jedny z nejpřesnějších měřících přístrojů na trhu. Princip činnosti podporuje velký pracovní rozsah, který dovoluje měřit hmotnostní průtoky od  $0,05\text{kg/h}$  až po  $400\text{t/h}$ . Mají velice vysokou přesnost, opakovatelnost a dokáží pracovat ve vysokém rozpětí teplot (Kadlec, 2015).

Princip měření využívá tzv. Coriolisovy síly. Těleso o hmotnosti  $m$  se pohybuje rychlostí  $\vec{u}$  v (neinerciální) soustavě, která se otáčí úhlovou rychlostí  $\vec{\omega}$ . Na toto těleso bude působit zrychlení nazývané „Coriolisovo zrychlení“.

$$\vec{a}_c = 2 \cdot (\vec{\omega} \times \vec{u}) \quad 4.1-1$$

Kde  $\vec{a}_c$  je Coriolisovo zrychlení

Pokud v potrubí proudí tekutina rychlostí  $\vec{u}$  a toto potrubí se otáčí úhlovou rychlostí  $\vec{\omega}$ , bude na každou částici tekutiny o hmotnosti  $\Delta m$  působit Coriolisova síla.

$$\Delta \vec{F}_C = 2 \Delta m \cdot (\vec{\omega} \times \vec{u}) \quad 4.1-2$$

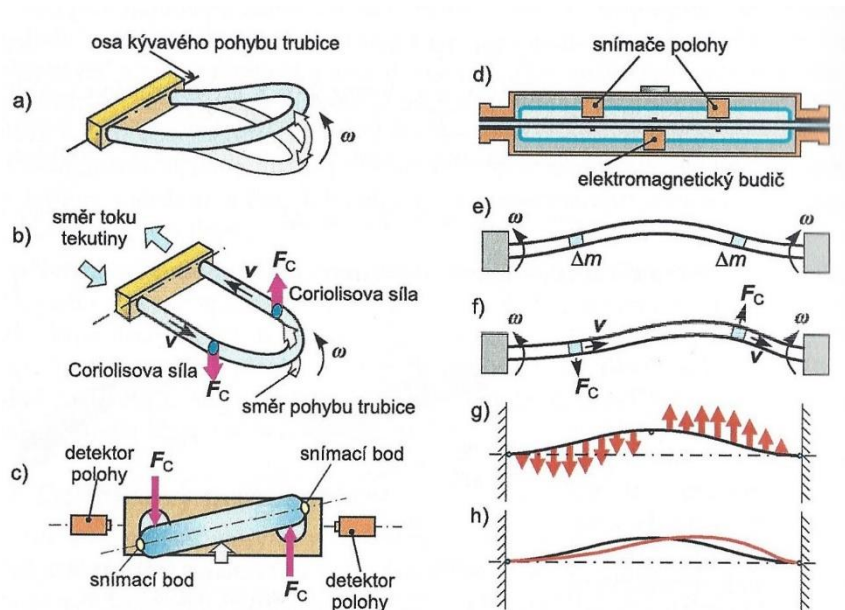
Výsledná Coriolisova síla poté působí směrem kolmým na rovinu vektorů  $(\vec{\omega}, \vec{u})$ . Po dosazení známých faktů, že  $\Delta m = Q_m \cdot \Delta t$  a  $\vec{u} = \frac{\Delta l}{\Delta t}$  dostáváme rovnici pro výpočet hmotnostního průtoku

$$|\Delta \vec{F}_C| = 2 \cdot Q_m \cdot \Delta t \cdot \left( \vec{\omega} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta t} \right) \quad 4.1-3$$

$$|\Delta \vec{F}_C| = 2 \cdot Q_m \cdot \vec{\omega} \cdot \Delta l \quad 4.1-4$$

Z rovnice je patrné, že Coriolisova síla působí na každý element tekutiny a je přímo úměrná hmotnostnímu průtoku  $Q_m$ . Jde tedy o přímý převod hmotnostního průtoku na sílu. (Ďaďo, 2005)

U samotných prakticky realizovaných průtokoměrů je úhlová rychlost substituována harmonickým kmitáním. Trubice je za pomoci elektromagnetické síly vertikálně rozkmitána. Díky tomu vykonává periodický kývavý pohyb s harmonickým průběhem o určitém kmitočtu. Při nenulové rychlosti průtoku bude Coriolisova síla rozdílná v místě vtoku a výtoku.



Obrázek 4.1.1 Účinek Coriolisovy síly

a) kmitající senzor ve tvaru U při nulovém průtoku b) působení Coriolisových sil při průtoku média, c) čelní pohled na deformovanou U-trubicí, d) schéma senzoru s přímou tubicí, e) kmitající trubice při nulovém průtoku, f) deformace kmitající trubice působením Coriolisových sil, g) vyznačení účinku Coriolisových sil, h) porovnání trubice při nulovém a nenulovém průtoku (Kadlec,2015)

Přístroj zapůjčený firmou „E+H“ využívá pro svůj chod jednu rovnou měřicí trubici. Principiálně je chod podobný jako u trubice tvaru U, avšak změny kmitání jsou v tomto případě složitější. Trubice je vychýlena střídavým elektromagnetickým polem a kmitání je snímáno za pomoci indukčního senzoru polohy. Působení sil je možné vysvětlit za použití obrázku 4.1.1. Elektromagnetická síla periodicky vychyluje trubici kolem osy  $\omega$ , takže jednotlivé konce vykonávají kývavý pohyb. V případě, že je rychlost proudění nulová, nedochází ke vzniku Coriolisovy síly a signály ze snímačů polohy jsou totožné (obr. 4.1.1.e). Při proudění tekutiny se na vstupu části tekutiny pohybují od osy rotace. Na výstupu se ovšem pohybují ke směru rotace. To má za důsledek vznik Coriolisových sil, které mají na obou koncích opačný smysl. Budící síla trubice se poté sčítá se vzniklou Coriolisovou silou. Výsledný součet je poté větší na vtoku nebo výtoku podle směru kyvu. (Ďaďo, 2005).

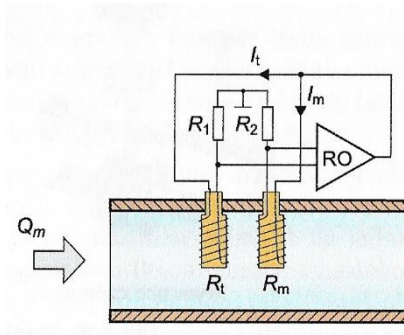
Kmitání kolem osy  $\omega$  způsobuje periodicky rozdílné deformace potrubí. Snímání na senzorech polohy probíhá za stejné frekvence. V každém sledovaném okamžiku ovšem budou mít sledované části trubice rozdílnou polohu. To bude odpovídat fázovému posuvu časových průběhů, který je úměrný hmotnostnímu průtoku (obr. 4.1.1.h).

## 4.2. Termické průtokoměry

Termické průtokoměry jsou druhou skupinou průtokoměrů, které místo objemového průtoku měří hmotnostní. Funkce je založena na výměně tepla mezi zdrojem a okolím. Zdrojem je v tomto případě vyhřívané odporové tělísko a okolí je proudící tekutina. Jsou vhodné, pokud jsou známy vlastnosti proudící tekutiny (Ďaďo,2005).

### 4.2.1. Termoanemometr

Termoanemometry vyhodnocují chladicí účinek protékající tekutiny na vyhřívaném odporovém čidle. Teplotní čidla jsou přímo vložena do proudící tekutiny a je vyhodnocován chladicí účinek na vyhřívaném čidle.



Obrázek 4.2.1.1: Princip termoanemometru (Kadlec, 2015)

Uvnitř potrubí jsou umístěna dvě čidla. Obvykle jsou umístěna za sebou, ale mohou být i umístěna vedle sebe. První čidlo  $R_t$  má mnohem větší odpor než druhé čidlo  $R_m$ . Zpravidla bývá tento rozdíl v poměru 1:100. Díky menšímu odporu prochází čidlem  $R_m$  větší proud, a proto je vyhříváno na mnohem vyšší teplotu. Druhé čidlo  $R_t$  není vyhříváno a odpovídá teplotě okolní tekutiny. Pokud nedochází k proudění, je teplo z vyhřívaného čidla odváděno za pomoci volné konvekce. Při průtoku tekutiny je však odváděno mnohem účinněji nucenou konvekcí. To se projeví větším ochlazením na vyhřívaném čidle  $R_m$ . Referenční čidlo  $R_t$  má díky vyššímu odporu stále teplotu okolní tekutiny. Obě čidla jsou zapojena do můstku a na něj je napojen regulační obvod. Tento obvod řídí napájecí napětí na čidlech tak, aby napětí na můstku bylo nulové. Hlavní projevem je tedy zvyšování proudu  $I_m$  a ohřátí čidla  $R_m$  na původní teplotu. Protože čidlo  $R_t$  má mnohem vyšší odpor, udržuje i nyní konstantní proud a teplotu. Hmotnostní průtok po ustálení nelineárně odpovídá hodnotě proudu  $I_m$ . (Kadlec, 2015)

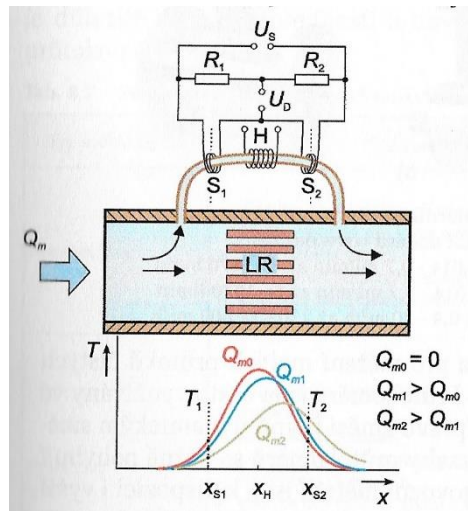
$$I_m^2 = a + b \cdot \sqrt{Q_m} \quad . \quad 4.2.1-1$$

Kde  $a$  vyjadřuje prostup tepla do okolí při nulovém průtoku

$b$  závisí na geometrii senzoru a základních vlastnostech tekutiny

### 4.2.2. Kalorimetr

Na rozdíl od předchozí skupiny vyhodnocují Kalorimetrické průtokoměry míru oteplení způsobenou prouděním tekutiny. Standardně se využívá dalšího menšího potrubí (obtoková kapilára). Skrz druhé potrubí prochází pouze malá část protékající tekutiny s ohledem na celkový průtok.



Obrázek 4.2.2.1: Princip kalorimetru (Kadlec,2015)

Toto druhé potrubí, tzv. kapilára, je opatřena dvojicí odporových senzorů  $S_1, S_2$ , snímající teplotu a jedním vyhřívacím vinutím  $H$ . Oba senzory jsou umístěny ve stejné vzdálenosti od topného tělesa a jsou zapojeny do Wheatstoneova můstku. Pokud  $Q_m = 0$  (žádná kapalina neproudí potrubím) je v důsledku symetrického šíření tepla hodnota na obou senzorech totožná takže  $T_1 = T_2$ . Jiná situace nastává ve chvíli kdy  $Q_m > 0$ . V tomto případě dochází k pohybu kapaliny jak v hlavním potrubí, tak v obtokové kapiláře. Pohybem tekutiny dojde k porušení tepelné rovnováhy na čidlech z důvodu nucené konvekce. Čidlo  $S_1$  nacházející se před topným tělesem bude mít nižší teplotu než čidlo  $S_2$ . Rozdílné teploty se projeví rozdílnou hodnotou rezistorů a dojde k výchylce napětí na můstku (Kadlec,2015) .

Hmotnostní průtok je následně v omezeném rozsahu (laminární průtok) lineárně závislý na teplotním rozdílu  $T_2 - T_1$ .

$$(T_2 - T_1) = A \cdot c_p \cdot P \cdot Q_m \quad 4.2.2-1$$

Kde

$A$  je konstanta

$c_p$  je měrná tepelná kapacita

$P$  je tepelný příkon

### 4.3. Ultrazvukové průtokoměry

Jak již název napovídá tyto přístroje využívají pro měření průtoku ultrazvukové vlnění. Ultrazvuk se šíří mezi vysílačem a přijímačem, které jsou připevněny na stěnách potrubí. Proudění tekutiny vyvolává změnu efektivní rychlosti ultrazvukového vlnění  $\vec{c}_0$  a to o průmět vektoru rychlost proudění  $\vec{u}$ . Samotný ultrazvuk je generován i přijímán měničem. Tento měnič pracuje střídavě v režimu přijímač nebo vysílač. Podle vyhodnocení signálu je poté možno dělit je do dvou skupin.

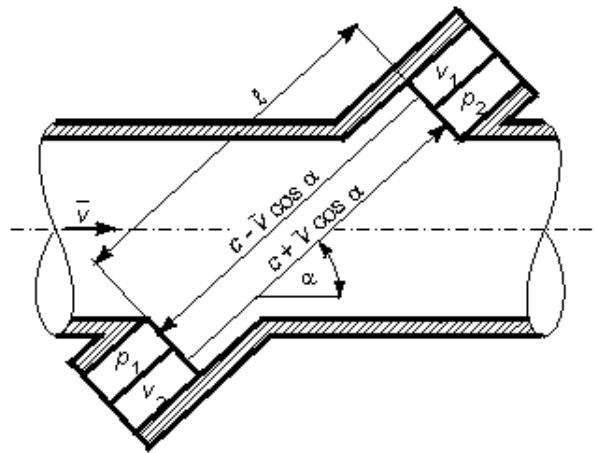
#### 4.3.1. S vyhodnocením doby průchodu

Základem tohoto průtokoměru je vysílač a přijímač ultrazvukového vlnění. Nejčastěji jsou využívány tzv. piezoelektrické měniče. Tyto senzory mohou pracovat v obou režimech: jako vysílače,

## Kapitola 4. Použité průtokoměry

tak i přijímače. Fungují na jednoduchém principu, že ultrazvukové vlny jsou přímo ovlivněny protékající tekutinou. Převáděno do jednoduché analogie, plavání proti proudu vyžaduje mnohem více energie a času než plavání po směru proudu. Měření s vyhodnocením doby průchodu pracuje na stejném principu (E+H, 2006).

Měníče opakovaně vysílají do potrubí ultrazvukové vlny jako krátké impulsy, od vysílače  $V_1$  k přijímači  $P_1$  a potom naopak od  $V_2$  k  $P_2$ . V případě, že v potrubí neproudí žádná kapalina, obdrží oba senzory signál s totožnou prodlevou od vyslání. V případě proudící kapaliny budou oba signály obdrženy s rozdílnou prodlevou. Pokud je známa vzdálenost mezi senzory, je možné vypočítat z doby průchodu rychlost šíření. Tato rychlost má složku, která je přímo úměrná rychlosti proudící tekutiny. Oba senzory jsou připojeny na jednotku, která periodicky generuje ultrazvukové vlny a měří jejich průchod. (Kadlec, 2015)



Obrázek 4.3.1.1: Princip ultrazvukového průtokoměru s vyhodnocením doby průchodu (VŠCHT)

Vysílač  $V_1$  bude vysílat impulsy ve směru proudění, zatímco vysílač  $V_2$  proti směru. Ultrazvuk vyslaný vysílačem  $V_1$  se bude šířit rychleji a to rychlostí  $c_0 + \bar{u} \cdot \cos \alpha$  kde  $c_0$  je základní rychlost šíření ultrazvuku v daném prostředí a  $\bar{u}$  je střední rychlost proudícího média. Rychlost ultrazvuku vyslaného v opačném směru vysílačem  $V_2$  bude zpomalená proudícím médiem a bude mít rychlost  $c_0 - \bar{u} \cdot \cos \alpha$ . Doby mezi jednotlivými vysílači a přijímači budou poté

$$\tau_1 = \frac{L}{c_0 + \bar{u} \cdot \cos \alpha} ; \tau_2 = \frac{L}{c_0 - \bar{u} \cdot \cos \alpha} \quad 4.3.1-1$$

Kde  $L$  je vzdálenost mezi jednotlivou sadou senzorů

Ze znalosti jednotlivých signálů lze poté dopočítat jejich rozdíl

$$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1 \quad 4.3.1-2$$

$$\Delta\tau = 2L \cdot \frac{\bar{u} \cdot \cos \alpha}{c_0^2 \cdot \bar{u}^2 \cdot \cos^2 \alpha} \quad 4.3.1-3$$

Za předpokladu, že platí  $u^2 \ll c_0^2$  lze upravit vztah následovně

$$\bar{u} \cong \frac{c_0^2}{2L \cdot \cos \alpha} \cdot (\tau_2 - \tau_1) \quad 4.3.1-4$$

I bez tohoto zanedbání linearit lze potlačit vliv kolísání rychlosti  $c_0$  jejím vyloučením z rovnice. Vyjádříme

$$\tau_1 \cdot \tau_2 = \frac{L^2}{c_0^2 - \bar{u}^2 \cdot \cos^2 \alpha} \quad 4.3.1-5$$

Po dosazení do vztahu 4.3.1-3 vyjádříme (DAŽO, 2005)

$$\bar{u} = \frac{L}{2 \cdot \cos \alpha} \cdot \frac{(\tau_2 - \tau_1)}{\tau_1 \cdot \tau_2} \quad 4.3.1-6$$

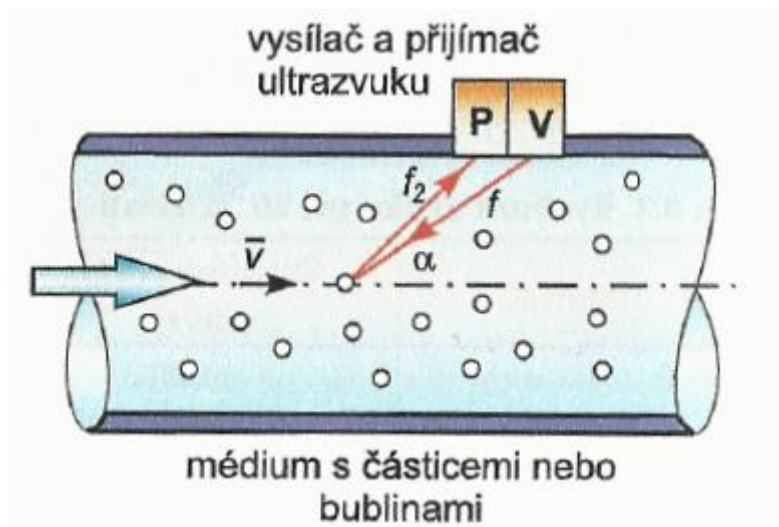
### 4.3.2. Dopplerovské

Průtokoměry založené na Dopplerově jevu vyhodnocují změnu frekvence vysílaného ultrazvuku od nečistot v proudu tekutiny. Z principu je tedy jasné, že v tekutině musí být rozptýleny částice, které odrážejí zvuk (bubliny, pevné částice). Bez těchto nečistot nebude zajištěna správná funkce průtokoměru. Prakticky vzato tyto průtokoměry neměří rychlost proudícího média, ale rychlost nečistot uvnitř tekutiny. Nehomogenity rozptýlené v kapalině fungují jako reflektory. V praxi se jedním měničem vysílá kontinuální ultrazvukové vlnění. Toto vlnění se odráží od nečistot v kapalině a je přijímáno druhým měničem (senzorem). Měníče mohou být umístěny jak na jedné straně potrubí, tak na protilehlých stranách (Dažo, 2005).

V důsledku Dopplerova jevu je pozorovaná frekvence vysílače  $f_v$  změřená při pohybu pozorovatele a/nebo zdroje (případně odražeče) s určitým rozdílem. Tento rozdíl je úměrný rychlosti  $u_p$  při pohybu pozorovatele, a/nebo  $u_z$  při pohybu zdroje (pohyb je myšlen vůči prostředí). Celkový vztah je poté

$$f_v = \frac{c - u_p}{c - u_z} f_0 \quad 4.3.2-1$$

Kde  $f_0$  je frekvence při klidovém stavu



Obrázek 4.3.2.1: Princip ultrazvukového průtokoměru na principu Dopplerova jevu, (Kadlec, 2015)

Do proudící kapaliny je vysílán ultrazvukový signál o známé frekvenci. Tento signál se odráží od pohybujících se částic nebo bublin. Při zachycení odraženého signálu na přijímači, je vyhodnocena změna přijatého signálu. Rozdíl mezi jednotlivými frekvencemi je poté přímo úměrný rychlosti

## Kapitola 4. Použité průtokoměry

proudícího média. Uvažujeme, že vysílač vysílá ultrazvuk o určité frekvenci  $f_0$ , rychlosti částice  $u$  a rychlosti ultrazvuku  $c$ . Frekvence přijatá částicí je poté

$$f_1 = \frac{c+u \cdot \cos \alpha}{c} \cdot f_0 \quad 4.3.2-2$$

Frekvence přijatá přijímačem je následně

$$f_2 = \frac{c}{c-u \cdot \cos \alpha} \cdot f_1 \quad 4.3.2-3$$

Při vyloučení  $f_1$  a za předpokladu, že  $c \gg u$  je možné zapsat rovnici jako

$$\Delta f = f_2 - f_0 \approx 2f_0 \frac{u}{c} \cdot \cos \alpha \quad 4.3.2-4$$

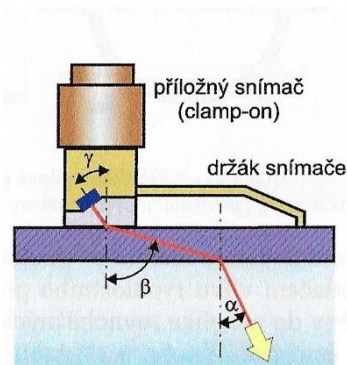
### 4.3.3. Uchycení na potrubí

Důležitou součástí pro měření signálu je také uchycení na měřicí potrubí. Dělení je na dvě skupiny podle umístění.

#### 4.3.3.1. Příložné senzory

Příložné senzory využívají vlastnosti ultrazvukové vlny. Senzor přiložený na potrubí dokáže vysílat ultrazvuk skrz stěnu, aniž by poničil samotné potrubí. Výhodou je, že senzor nemusí mít otvor v potrubí a tím nedochází ke styku s tekutinou. Charakteristikou senzoru je, že vlny vždy projdou skrz střed potrubí, které slouží jako vodič ultrazvukových vln (E+H,2006) .

Zapůjčený průtokoměr, který slouží jakožto referenční, je tohoto typu.

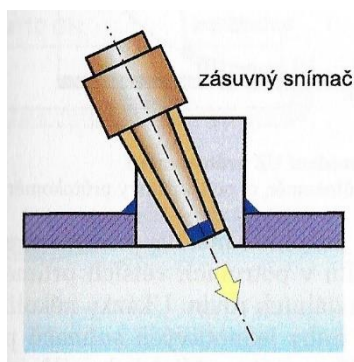


Obrázek 4.3.3.1.1: Příložný ultrazvukový senzor (Kadlec,2015)

#### 4.3.3.2. Zásuvné senzory

Senzory přicházející do styku s kapalinou jsou známy jako zásuvné senzory. Využití nachází v případech, když vodivost ultrazvuku v materiálu potrubí je příliš nízká. Hlavní nevýhodou je potřeba otvoru v potrubí, kam se senzor umístí (E+H,2006) .

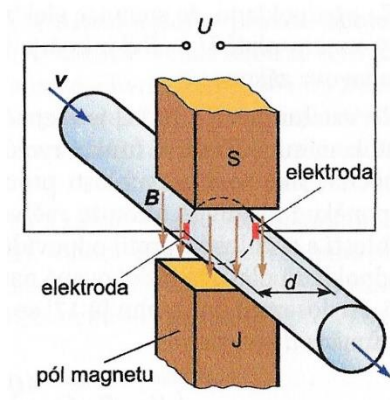




Obrázek 4.3.3.2.1: Zásuvný ultrazvukový senzor (Kadlec,2015)

#### 4.4. Magneticko-indukční průtokoměr

Magneticko-indukční průtokoměry nabízí možnost měřit velké množství kapalin. Jedinou podmínkou pro měření je minimální vodivost dané látky. Tato podmínka také vylučuje jakékoliv měření plynů. V odborných dokumentech a publikacích je možné se setkat s různými názvy pro tento průtokoměr. Využívány jsou například názvy indukční, magneticko-indukční, elektromagnetický, magnetický aj. Norma ČSN 24006 však doporučuje využití názvu „indukční průtokoměr“. Z tohoto důvodu bude v dalších částech práce využit tento název (Kadlec, 2015).



Obrázek 4.4.1: Princip indukčního senzoru (Kadlec,2015)

Nejčastějším vysvětlením funkce indukčního průtokoměru je příměr na základě Faradayova indukčního zákona. Podle tohoto zákona je vznik napětí následkem časové změny magnetického toku při pohybu vodiče (v tomto případě kapaliny) v magnetickém poli. Jednodušeji řečeno, pohybem kapaliny napříč magnetickým polem o indukci  $\vec{B}$  rychlostí  $\vec{u}$  dochází na elektrodách k indukci napětí  $U$  o velikosti dané následujícími vztahem

$$U = B \cdot D \cdot u \quad 4.4-1$$

Pokud bude potrubí kruhového průřezu je možné zapsat celý vztah jako

$$U = B \cdot D \cdot \frac{4 \cdot Q_V}{\pi \cdot D^2} \quad 4.4-2$$

Kde  $D$  je vzdálenost elektrod (průměr potrubí)

$Q_V$  je objemový průtok

Druhé možné vysvětlení je za pomoci Lorenzova zákona. Tato definice je mnohem bližší samotné fyzikální podstatě děje. Na náboj  $q$  pohybující se v magnetickém poli o indukci  $\vec{B}$  rychlostí  $\vec{u}$  působí kolmá Lorentzova síla  $\vec{F}_m$  a zároveň elektrická síla  $\vec{F}_e$  v elektrickém poli o intenzitě  $\vec{E}$ . Síla  $\vec{F}_m$  vyvolána působením magnetického pole, vychýlí tento náboj a je dána následujícím vztahem (Ďaďo,2005)

$$\vec{F}_M = q(\vec{u} \times \vec{B}) \quad 4.4-3$$

Působením této síly dochází k vychýlení směrem k elektrodám, kde se náboje hromadí. Tím se vytváří rozdíl potenciálů (napětí  $U$ ). Intenzita pole je dána napětím na elektrodách a jejich vzdáleností (průměr potrubí  $d$ )

$$|\vec{E}| = \frac{U}{d} \quad 4.4-4$$

Elektrická síla, která působí na náboje v opačném směru, než síla magnetická je

$$\vec{F}_e = q \cdot \vec{E} \quad 4.4-5$$

Rovnováha nastane ve chvíli, kdy jsou si obě síly rovny. Proto platí pro napětí mezi elektrodami závislost

$$\vec{F}_m = \vec{F}_e \quad 4.4-6$$

$$|q(v \times B)| = q \cdot \frac{U}{d} \quad 4.4-7$$

Tato skutečnost se dá zapsat známou závislostí

$$U = B \cdot D \cdot u \quad 4.4-1$$

Tato rovnice však platí za předpokladu, který plyne z pravidel vektorového součinu. Tj. že osa elektrod  $D$  je kolmá na rovinu v níž jsou navzájem kolmé vektory  $\vec{B}$  a  $\vec{u}$  (Kadlec,2015).

## 4.5. Vírový průtokoměr

Funkce vírových průtokoměrů je založena na tzv. von Kármánově efektu. Vznik tohoto efektu je zapříčiněn vložením překážky neaerodynamického tvaru do proudící tekutiny. Tekutina je poté donucena k obtékání této překážky. Tato situace má za důsledek vznik vírů po obou stranách, které se následně oddělují od překážky a vytváří tzv. von Kármánovu stezku (angl. „vortex street“). Tím, že dochází k vytváření vírů dochází k okamžité změně rychlosti a tlaku. Celý proces je snímán senzorem detekujícím víry a poté převeden na elektrický signál. Frekvence vzniku vírů je poté v určitém rozsahu Reynoldsova čísla přímo úměrná rychlosti proudící tekutiny. Rychlost se dá následně převést na objemový průtok, a to za pomoci následujícího vztahu

$$\frac{Q_V}{f \cdot D^3} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{S_r} \cdot \frac{b}{D} \quad 4.5-1$$

Kde  $Q_V$  je objemový průtok

$f$  je základní frekvence vzniku kmitajících vírů

$D$  je průměr potrubí

$b$  je šířka čelní plochy vnořeného tělesa

#### Kapitola 4. Použité průtokoměry

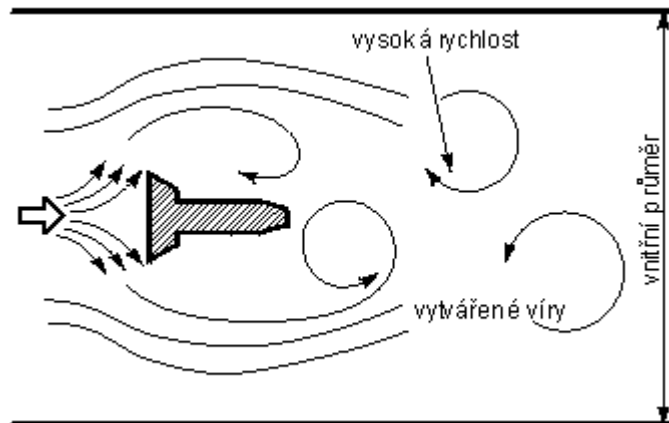
$S_r$  je bezrozměrná Strouhalova konstanta, vyjadřující rychlost změny rychlostního pole v závislosti na čase

Frekvenci vzniku kmitajících vírů poté můžeme vyjádřit následovně

$$f = S_r \frac{u}{b}$$

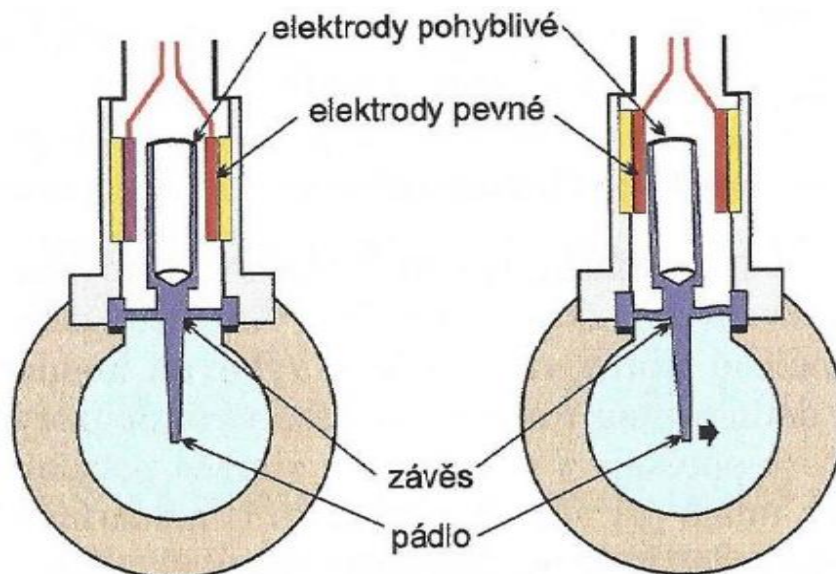
4.5-2

Kde  $u$  je rychlost proudění



Obrázek 4.5.1: Vznik vírů na překážce (VŠCHT)

Zapůjčený vírový průtokoměr od firmy „E+H“ využívá pro své měření vylepšení předchozí metody. Tento způsob se nazývá „Differential switched capacitor“ (zkráceně DSC), neboli rozdílové kapacitní senzory. Celé zapojení je založeno na pohyblivém pádle, které se vychyluje do stran působením tvořených vírů. Na toto pádlo je umístěna elektroda rozdělená na dvě části. Mezera mezi vnitřní pohyblivou elektrodou a vnějšími pevnými elektrodami vytváří kapacity  $C_1$  a  $C_2$ . Pohyb pádla má za důsledek vychýlení středové elektrody z klidové polohy kdy  $C_1 = C_2$ . Díky působícím vírům se tedy změní velikost kapacit a  $C_1 \neq C_2$ . Celá situace je převedena na elektrický proud a vyhodnocena. (Ďaďo, 2005).



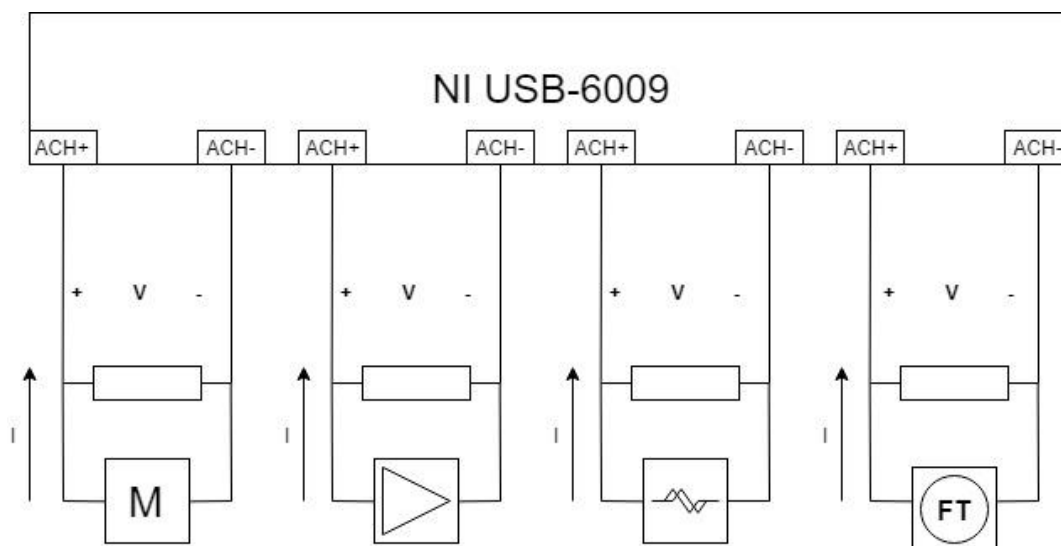
Obrázek 4.5.2: DSC senzor (Kadlec, 2015)

## 5. Praktická část

### 5.1. Vytvoření aplikace a hardwaru

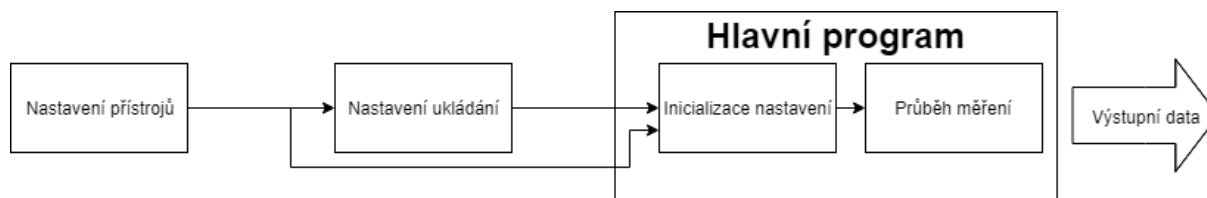
#### 5.1.1. Měřicí část

Pro usnadnění a snížení časové náročnosti měření bylo nutné vytvořit vybavení pro sběr dat a automatizaci měření. Všechny použité přístroje posílají naměřený průtok ve formě proudové smyčky (4 – 20mA). Proudová smyčka je druh signálu, kdy přístroj vysílá svůj signál v podobě proudu a ten je v záznamníku převeden na výstupní hodnoty. Katedra měření používá pro své aplikace většinou měřicí převodníky (DAQ moduly) od firmy „National Instruments“. Jeden z těchto převodníků byl zapůjčen pro účely této práce. Zapůjčený přístroj je jednoduchý převodník s označením „NI USB-6009“ s USB připojením k PC, poskytující 8 multiplexovaných analogových vstupů (resp. 4 diferenciální) s rozlišením 14bitů a 2 analogové výstupy s rozlišením 12bitů. Jak již bylo zmíněno přístroje vysílají hodnoty průtoků jakožto proudy. Převodník však pracuje pouze s hodnotou napětí. Bylo tedy nutné převést pomocí snímacího odporu proud z přístrojů na napětí, které by přístroj mohl změřit. Převod je velice jednoduchý za pomoci Ohmova zákona. Rozsah analogových vstupů převodníku je  $\pm 10V$ . Díky tomu bylo možné využít odpor v rozsahu 0 – 500 $\Omega$ .

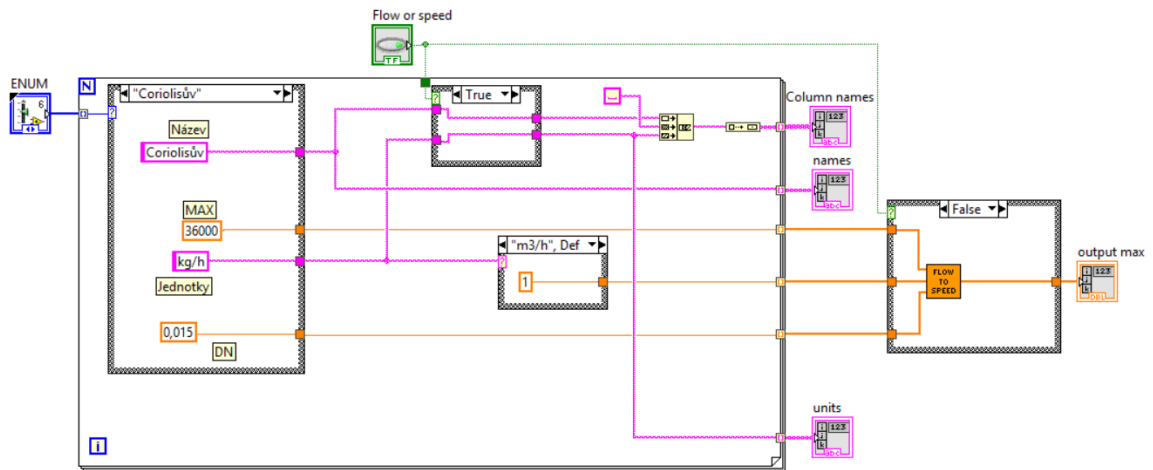


Obrázek 5.1.1.1: Schématické zapojení převodu signálu

Samotná aplikace v prostředí NI LabView je rozdělena na tři části. Každá část obstarává jiný úkol a dohromady obstarávají celkovou funkci.



Obrázek 5.1.1.2: Blokové schéma měřicího programu



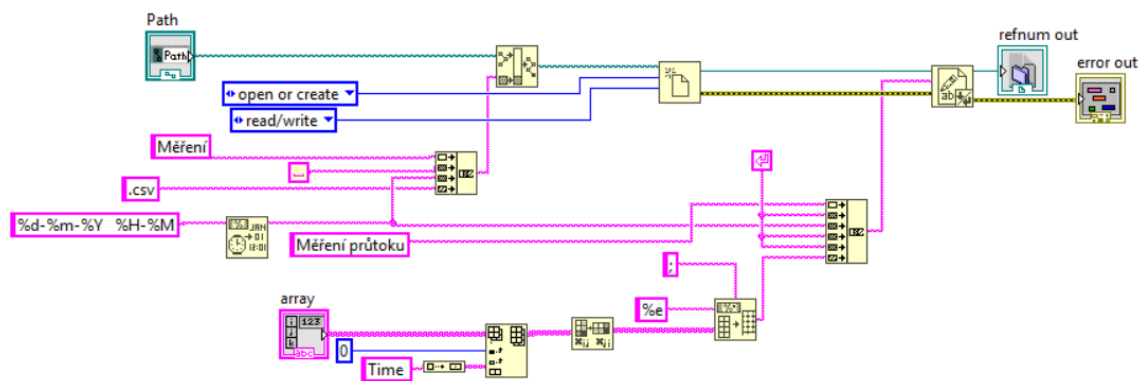
Obrázek 5.1.1.3: Nastavení základních vlastností průtokoměrů

První částí zde je nastavení základních vlastností průtokoměrů. Hlavní ovládání zde provádí tzv. enumenátor. Podle jeho hodnot je přiřazeno jednotlivým vstupům nastavení přiřazených průtokoměrů. Mezi nastavení patří

- 1) Název (typ) průtokoměru
- 2) Maximální možný průtok
- 3) Informace, zda se jedná o hmotnostní nebo objemový průtokoměr
- 4) Průměr potrubí pro určení rychlosti proudění

Druhotné nastavení zde provádí přepínač volby mezi průtokem a rychlostí proudění. Podle jeho hodnoty je přiřazena jednotlivým průtokoměrům příslušná jednotka. Taktéž je v případě přepnutí na rychlost proudění přepočtena hodnota průtoku na rychlost.

Druhá část měřicí aplikace je nastavení ukládací metody. Zde se nastavují informace pro vytvoření souboru a typ ukládání.



Obrázek 5.1.1.4: Nastavení a vytvoření ukládacího souboru

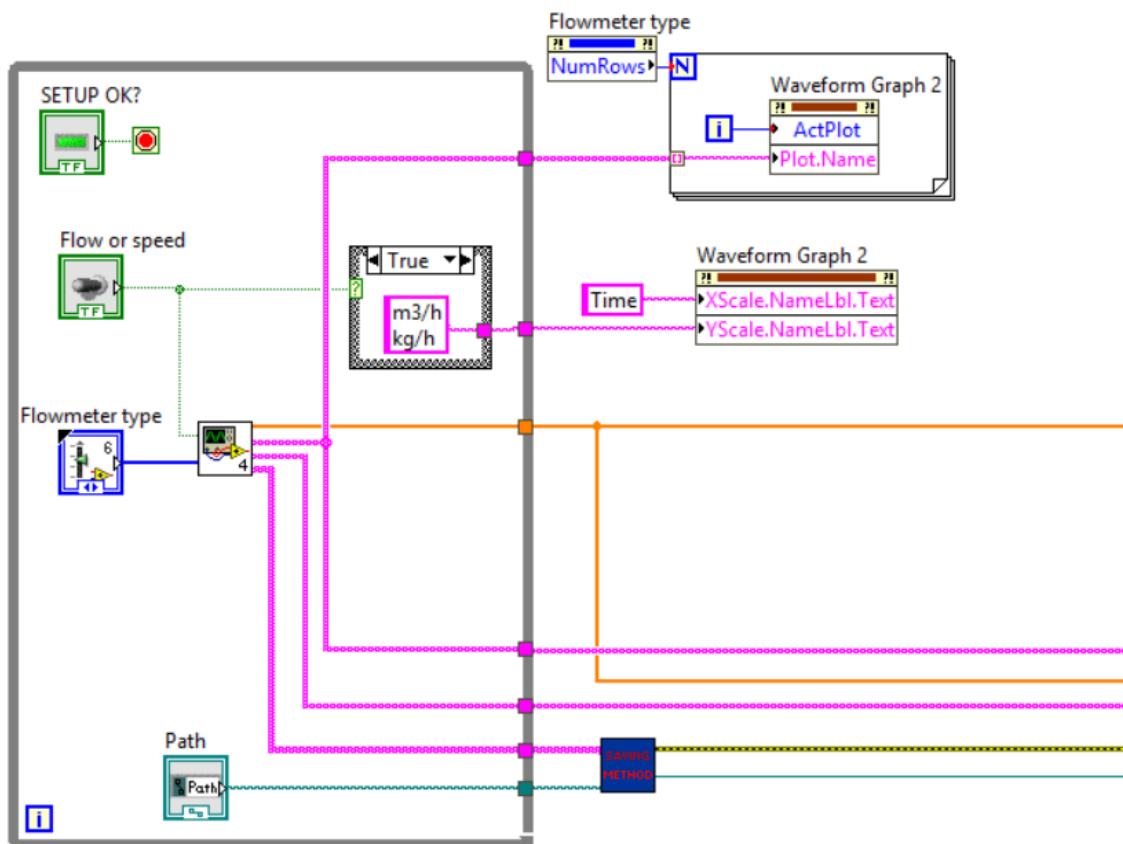
V této části je pouze jeden ovládací prvek. Je jím nastavení cesty souboru pro ukládání. Soubor se dá ukládat kdekoli v počítači, USB, nebo vzdáleném disku. Název a formát jsou automatické. Je nutné však napsat celou cestu. Příklad zapsání cesty je například

*C:\Users\User\Desktop\*

V takovém případě bude soubor uložen na plochu. Jeho název je závislý na datu, kdy byl soubor vytvořen. Může být například

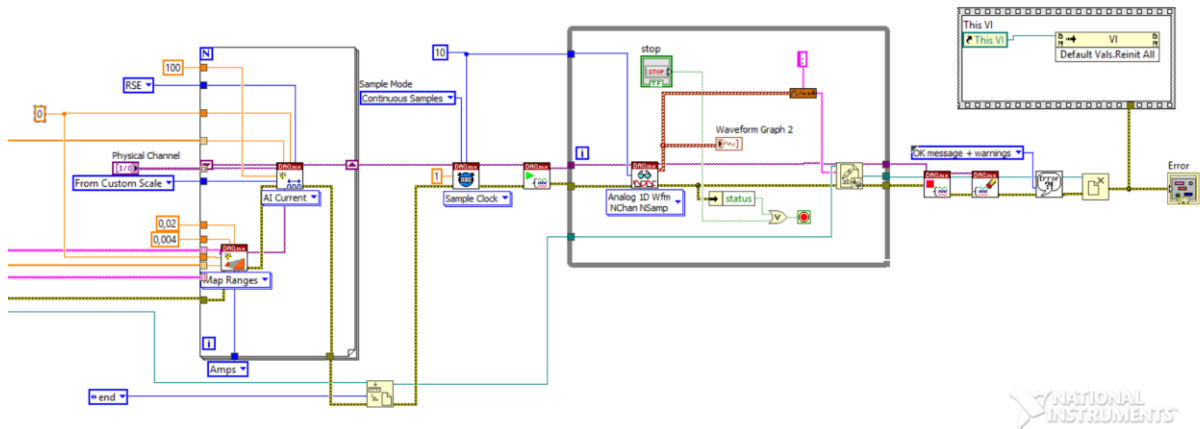
*Měření 29 – 3 – 2019 19 – 19.csv*

Soubory .csv jsou často využívány v průmyslu. Jedná se o tzv. hodnoty oddělené čárkou. V tomto případě je jakožto oddělovač zvolen středník. Důvodem je jazyková lokalizace pro Českou republiku. Při vytváření souboru jsou aplikaci umožněny operace k otevírání a vytváření souborů. Také má následně umožněno otevírat a zapisovat do již vytvořeného souboru. Při vytváření souboru jsou taktéž pojmenovány jednotlivé sloupce, tak aby při měření docházelo k zápisu hodnot ke správným průtokoměrům.



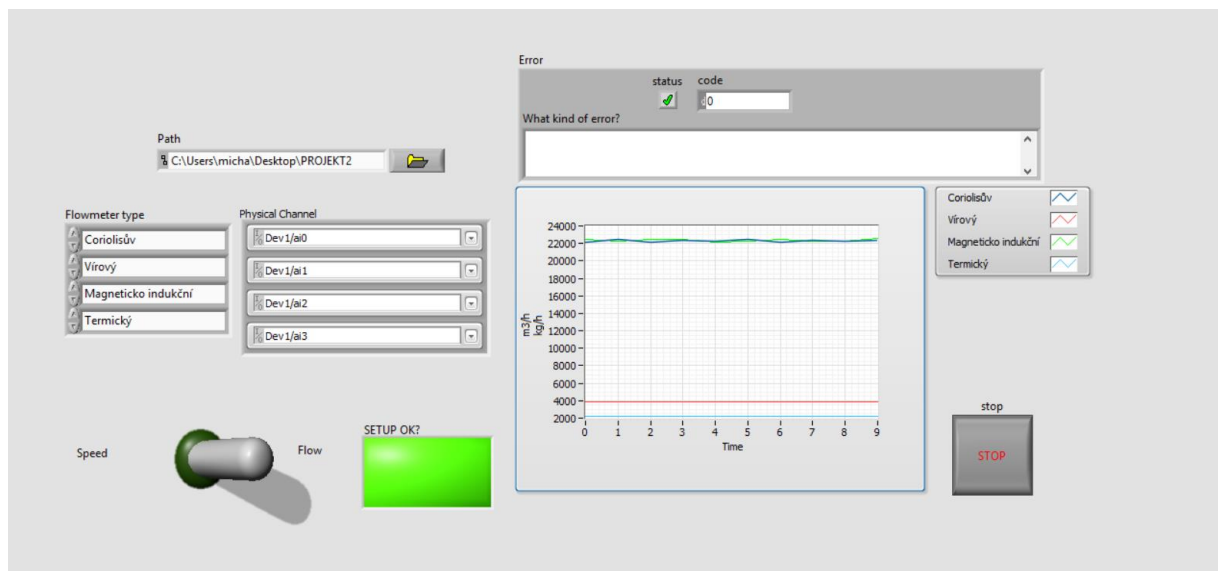
Obrázek 5.1.1.5: Ovládací část finální aplikace

Poslední část je již spojení předchozích dvou podprogramů do finální aplikace. Nejdříve uživatel nastaví prvotní podmínky pro měření. Jedná se o přiřazení správných průtokoměrů k jednotlivým vstupním kanálům. Následně zvolí, zda se měří průtok, nebo rychlost proudění. Ve chvíli, kdy odsouhlasí nastavení, vykonávání programu pokročí dále a vytvoří se požadovaný soubor. Dojde také k pojmenování jednotlivých os a vytvoření legendy grafů. Když je vytvořen soubor přechází vykonávání programu do druhé části, kde probíhá měření.



Obrázek 5.1.1.6: Měřicí část finální aplikace

V druhé, měřicí části jsou přiřazeny základní vlastnosti měřicích vstupů. Je zde určeno že se jedná o měření elektrického proudu. K tomu je přiřazen rozsah, v jakém přichází jednotlivé signály. Jak již bylo zmíněno, USB převodník pracuje pouze s hodnotou napětí, proto je zde nastavena i velikost odporu. Ke správné funkci bylo nutné určit, že se jedná o měření změny potenciálu mezi vstupem a zemí (RSE, referenced single-ended). K jednotlivým vstupům je díky určení průtokoměru dodáno i správné měřítko průtoků. Vykonávání programu následně pokračuje a dochází k záznamu naměřených dat každou sekundu. Po deseti sekundách dochází k zápisu do předem připraveného souboru a zobrazení hodnot v grafu. Tento zápis probíhá do doby, než je zmáčknuto tlačítko stop. Když dojde k ukončení měření jsou všechna měření ukončena a veškeré nastavení je vynulováno na základní hodnoty.



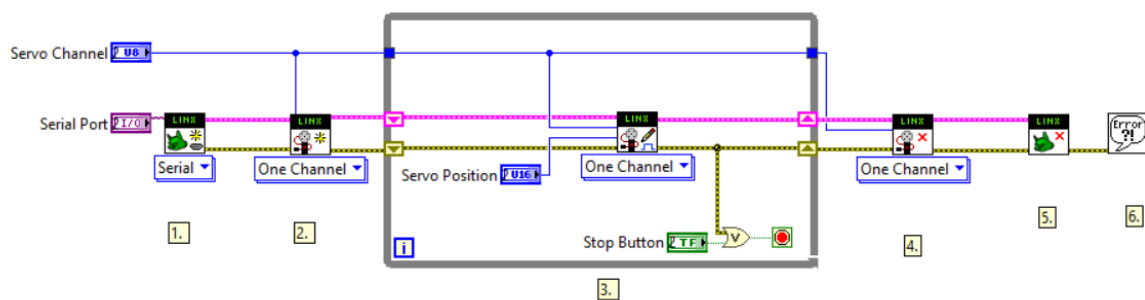
Obrázek 5.1.1.7: Ovládací panel aplikace

## 5.1.2. Regulační část

Regulační část pro ovládání čerpadla byla vytvořena podobně jako část měřicí za pomoci programu NI LabVIEW. K její funkci však již není využit USB převodník firmy National Instruments ale jednodeskový počítač firmy Arduino. Nejedná se o počítač ve smyslu stolních počítačů, nebo telefonů. Dokáže však velice dobře ovládat diody, displeje, senzory a různé druhy pulzních signálů pro řízení motorů.

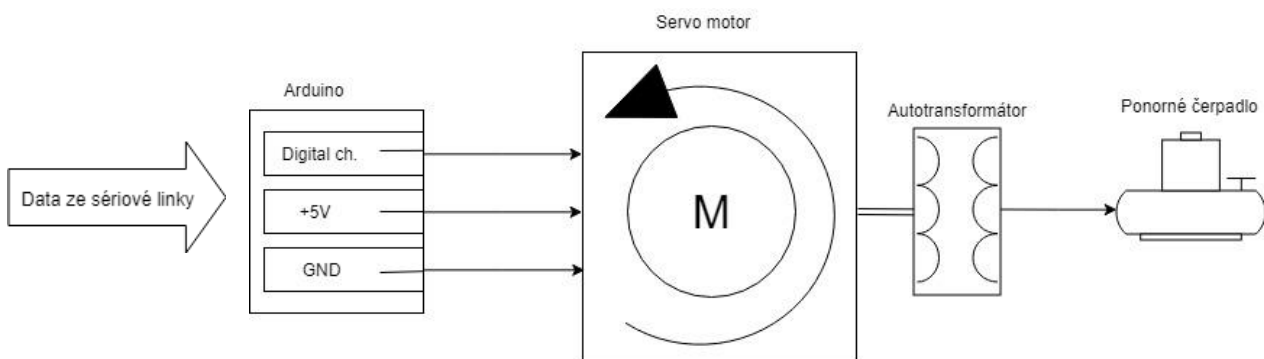
Hlavním programovacím jazykem je v tomto případě speciální jazyk podobný C/C++. Jelikož prostředí LabView nepodporuje tento jazyk, bylo nutné do něj přidat speciální vylepšení, který jej dokáže napodobit. Výkon čerpadla může být regulován za pomoci triakového regulátoru nebo autotransformátoru. V práci bylo čerpadlo napojeno na autotransformátor. Tento autotransformátor je poté možno ovládat za pomoci servomotoru prostřednictvím Arduina. Tento způsob má několik výhod

- 1) Možnost využití pro různé druhy čerpadel
- 2) Lehká ovladatelnost
- 3) Poměr cena/výkon
- 4) V případě potřeby je možné servomotor odpojit a regulovat manuálně
- 5) Menší hodnoty tlaků při regulaci, na rozdíl například od regulace škrcením



Obrázek 5.1.2.1: Aplikace pro regulaci průtoku

Samotná aplikace funguje na velice jednoduchém principu. Nejdříve je nutné nastavit správný sériový port Arduina a kanál servomotoru. Následně se naváže spojení s tímto servomotorem. Za pomoci otočného kola v grafickém uživatelském rozhraní běžícího programu je možné zapisovat požadovanou šířku vysílaných řídicích pulzů. Zabudovaná elektronika přijímá impulsy a porovnává jejich délku s odporem potenciometrického snímače úhlové polohy. Pokud přijde například impuls o délce 2,5ms, elektronika ví, že odpovídající odpor úhlového snímače má být například 1800Ω. Elektronika následně pouští do servo-motorku kladný nebo záporný proud, aby dosáhla požadované hodnoty na potenciometrickém úhlovém snímači. Po ukončení je veškeré spojení opět uzavřeno pro uvolnění sériové linky a paměti.



Obrázek 5.1.2.2: Hrubé schématické zapojení regulace



## 5.2. Testování látek

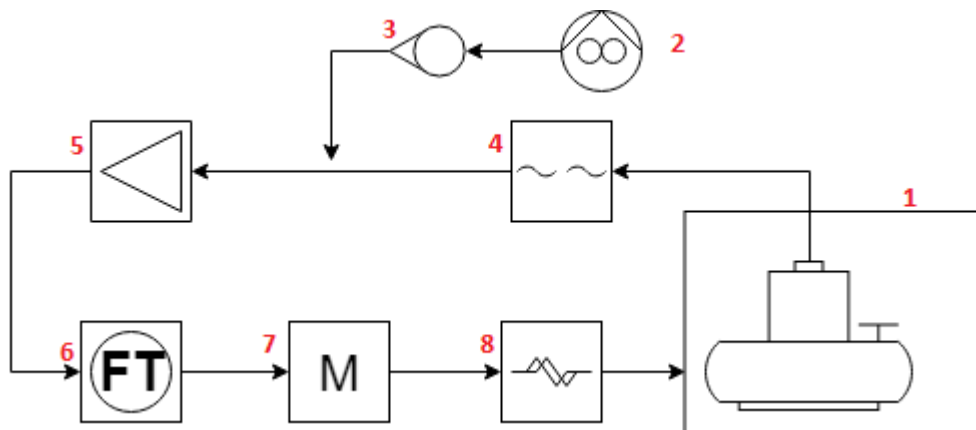
Pro správné ověření chování přístrojů bylo nutné zvolit širokou škálu testovaných látek. Všechny použité látky však musely být v určitém ohledu spjaté s tématem průtoku. Některé látky bylo možné sehnat z volného prodeje v obchodech. Jiné látky by však byly příliš nákladné k pořízení svépomocí. Během měření proběhl kontakt se zástupci mnoha firem s žádostí o poskytnutí vzorků k testování. Díky tomu kontaktované firmy dodaly mnoho látek o rozdílných vlastnostech.

- 1) Pevné látky
  - a. Písek křemičitý bílý
  - b. Jíl - Kaolín
  - c. Vápno - hašené
- 2) Kapaliny – potraviny
  - a. Mléko
  - b. Směs na výrobu zmrzliny
  - c. Ovocné sirupy
- 3) Kapaliny – drogistické zboží
  - a. Lenor SOMMERBRISÉ
  - b. Lenor HYPOALERGEN
  - c. Jar Ultra
  - d. Jar Sensitive

Z přiloženého seznamu je možné vidět, že získané látky zastoupily měření z různých průmyslových odvětví. Měly rozdílné hustoty, viskozity, tepelné vodivosti a jiné fyzikální vlastnosti. Díky tomu šlo porovnat chování průtokoměrů s ohledem na mnoho různých vlastností. Zatímco pevné látky byly smíchány s vodou jako suspenze, kapaliny šlo testovat později samotné nebo pouze za přítomnosti příměsi vzduchu. Důvodem pro měření bez vody byl fakt, že v těchto odvětvích dochází k velkým ztrátám na materiálu (samotná testovaná směs).

Testy probíhaly podle jednoduchého principu. Čerpadlo vhánělo kapalinu do potrubí. Prvním zde umístěným průtokoměrem byl ultrazvukový průtokoměr. Tento přístroj sloužil jakožto referenční. (Před samotným měřením byla proměřena statická charakteristika ultrazvukového přístroje za pomoci Coriolisova průtokoměru. To bylo nutné, protože zde byl předpoklad sníženého výkonu čerpadla u hustších/viskóznějších směsí.) Za referenčním průtokoměrem se nacházelo vzduchové čerpadlo, které přes rotametr vhánělo vzduch do proudící kapaliny. Následně byla do proudu výsledné směsi zařazena série zbylých přístrojů, kdy přístroje byly uspořádány v pořadí Vírový, Termický, Magneticko-indukční a Coriolisův. Za posledním přístrojem se kapalina vracela do zásobní nádoby.

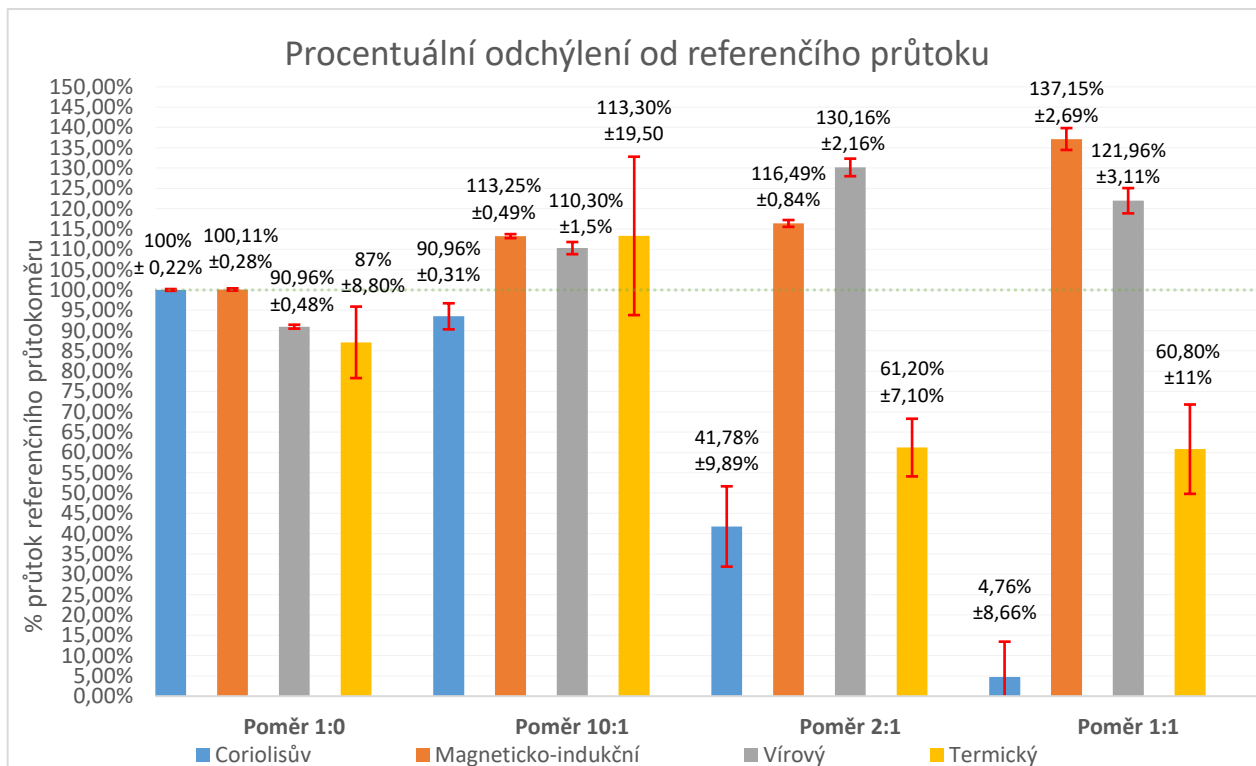
Během měření došlo k záznamu dat. Tato data následně byla převedena na průměrný průtok. Jelikož se zde jednalo o dlouhodobá měření záměrem na vyhodnocení přesnosti přístrojů, byla také statisticky vypočtena směrodatná odchylka.



Obrázek 5.2.1: Schéma zapojení modelu 1) zásobní nádoba s ponorným čerpadlem, 2) vzduchové čerpadlo, 3) rotametr 4) Ultrazvukový, 5) Vírový, 6) Termický, 7) Magneticko-indukční, 8) Coriolisův

### 5.2.1. Získané znalosti o chování z bakalářské práce

Měření látek navazovalo na předchozí bakalářskou práci (Hájek, 2017). V této práci došlo k měření vlivu přimíchání rozdílného objemu vzduchu do předem určeného průtoku vody. Jelikož vzduch má odlišné fyzikální vlastnosti než voda, ovlivňuje každý z přístrojů jinak. Jakožto referenční průtok posloužila hodnota průtoku čisté vody z Coriolisova průtokoměru. Důvodem je, že se jedná o nejpřesnější přístroj ze všech použitých. Objemový, popřípadě hmotnostní, průtok byl převeden na rychlost průtoku, která by měla být pro všechny přístroje totožná. Rychlost průtoku na jednotlivých přístrojích byla poté vyjádřena v procentech.



Graf 1: Odchýlení měření v případě různého poměrného objemu vzduchu, Referenční průtok 1 m<sup>3</sup>/h čistá voda, 0,6m<sup>3</sup>/h s přiměsí vzduchu (Hájek, 2017)

Z grafu 1 je možné vidět, že v případě čisté kapaliny podávaly přístroje nejpřesnější výsledky Coriolisův a Magneticko-indukční průtokoměr. Vírový a termický průtokoměr naproti tomu hlásily

trvale nižší hodnotu průtoku, než odpovídala skutečnosti. Směrodatná odchylka přístrojů určená ze statistického zpracování naměřených údajů (naznačená úsečkou) byla velice nízká. Pouze u termického průtokoměru je možné vidět vysokou směrodatnou odchylku. Možná odchylka je dána vznikem bublin v kapalině z důvodu kavitace na čerpadle

Nejvyšší ovlivnění přimíchaným vzduchem bylo možné pozorovat u Coriolisova průtokoměru. Zde mohou nastat dvě situace ovlivnění.

- 1) Bublínkový efekt – V kapalině jsou volně rozptýleny bubliny. Tyto bubliny se pohybují při oscilacích trubice opačným směrem než kapalina. Tím dochází ke změně amplitudy a výsledná hodnota průtoku je snížena.
- 2) Rezonanční efekt – Bublínky je možné stlačit a vznikají tzv. pozastavené bubliny. Z důvodu stlačení se bubliny nepohybují v opačném směru než kapalina. Dochází tedy ke změně frekvence v potrubí. Výsledná hodnota průtoku je následně zvýšena. (Zhu, 2016)

U malých objemů vzduchu se projevovaly oba efekty, a proto odchýlení nebylo tak vysoké. Se zvyšujícím se množstvím však převládal bublínkový efekt. Z tohoto důvodu docházelo ke snížení naměřené hodnoty průtoku a zvýšení směrodatné odchylky. Hlavním důvodem zvýšení odchylky bylo střídání míst se vzduchovými bublinami a čisté kapaliny, které se projevilo častými skoky mezi naměřenými hodnotami.

Ovlivnění u Magneticko-indukčního je s příměsí vzduchu kladné. Přístroj nedokáže rozpoznat bublinky v kapalině. To znamená, že bublinky vzduchu jsou mylně považovány za kapalinu. S menším množstvím vzduchu a vyšší rychlostí proudění (indukční průtokoměr má menší průměr potrubí než ostatní přístroje) dosahuje nejnižších hodnot směrodatné odchylky. Zvyšující se množství vzduchu zvětšovalo velikost bublin, a proto také byla hodnota průtoku zvýšena více.

Vírový průtokoměr bohužel v případě čisté kapaliny podával nižší hodnotu, než protékala ve skutečnosti. Vzduchové bubliny v tomto případě způsobovaly zvýšení u naměřené rychlosti průtoku. Z důvodu konstrukce senzoru (DSC senzor) docházelo k pohybu měřícího pádla vlivem bublin. Senzor mylně považoval bubliny za vzniklé víry. U vyššího množství vzduchu se tvořily kapsy natolik velké, že již pádlem nepohybovaly tak často. Proto je zde naměřena menší hodnota průtoku a také směrodatná odchylka.

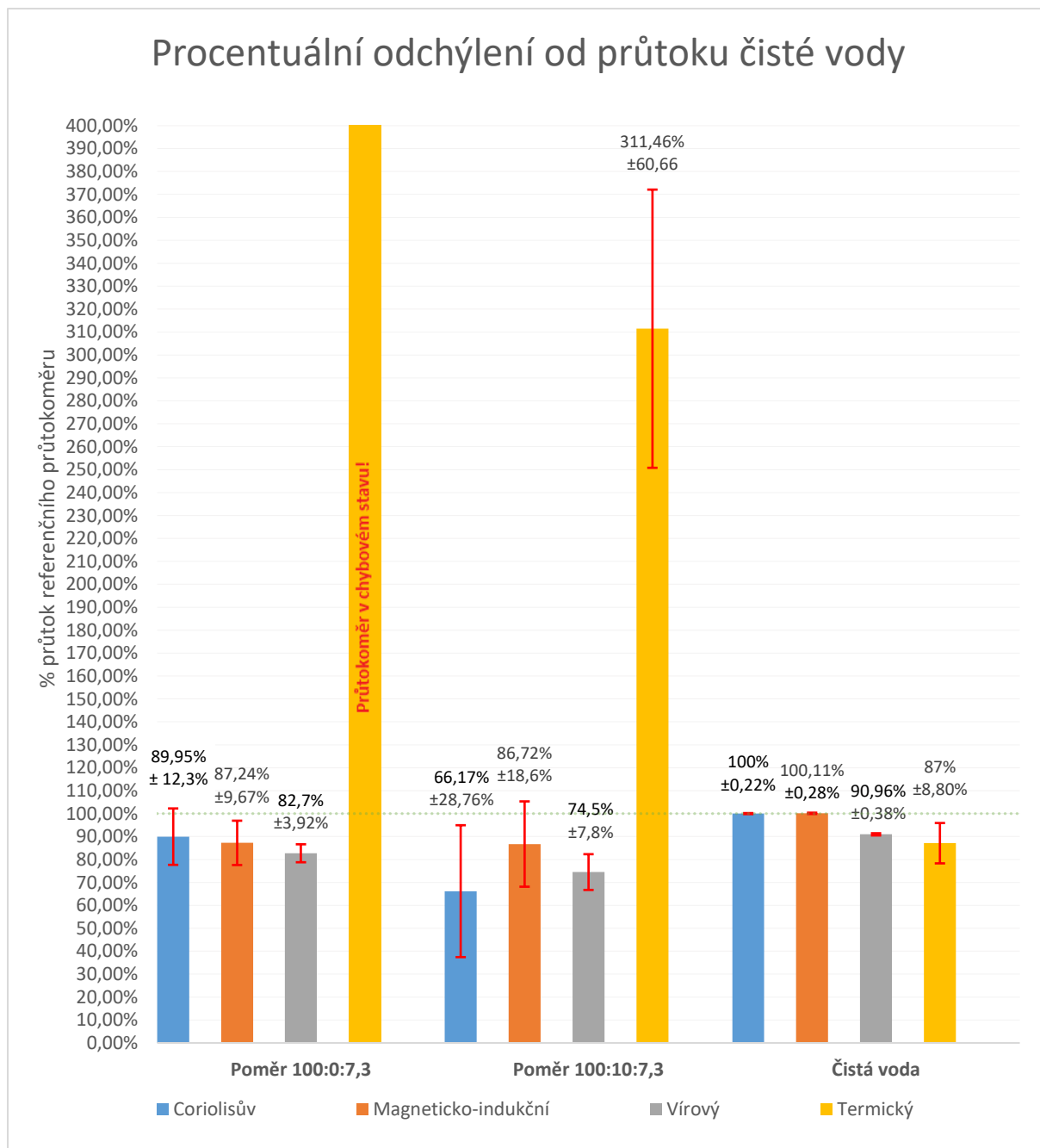
Termický průtokoměr podával nejméně přesné výsledky. Odchýlení hodnot může být dáno jiným průměrem potrubí (DN40). Většinou podával nižší hodnotu průtoku. Směrodatná odchylka byla taktéž nejvyšší ze všech. Bude-li pomínuta hodnota sm. odchylky, podával přístroj více přesné výsledky než Coriolisův průtokoměr (Hájek, 2017).

Druh přístroje	Maximální chyba specifikovaná výrobcem
Coriolisův	Až 2,5% z naměřené hodnoty
Magneticko-indukční	Až 2,5% z naměřené hodnoty $\pm 5\mu A$
Vírový	Až 10% z naměřené hodnoty
Termický	Až 20% z maximálního průtoku
Ultrazvukový	Až 3% z naměřené hodnoty $\pm 3mm/s$

Tabulka 1: Maximální možná chyba přístroje specifikovaná výrobcem

### 5.2.2. Písek křemičitý bílý

Písek je složený z drobných kamínků různého původu. Má vysokou hustotu, která je závislá na vlhkosti. Obvykle se pohybuje v rozmezí mezi  $1500 - 1700 \text{ kg/m}^3$ . Jelikož je jeho hustota vyšší než vody, docházelo k usazování na dně měřicí nádoby s vodou. Aby došlo k zamezení usazování bylo umístěno na dno nádoby druhé čerpadlo, které vířilo vodu. V průběhu měření došlo několikrát k odebrání části proudící kapaliny. Na základě odběru byl určen průměrný objem písku v kapalině. Z průměru následně experimentálně s ohledem na objem šlo určit množství písku v kapalině. Výsledný poměr vycházel tak, že na přibližně  $1,1\text{l}$  proudícího média náleží přibližně  $73\text{ml}$  písku. To odpovídá hmotnosti přibližně  $100\text{g}$  písku na  $1\text{kg}$  vody. Z toho lze určit že poměr je  $100:7,3$  v případě objemu a  $100:10$  v případě hmotnosti. Před přidáním písku bylo naměřeno, že průtok čisté kapaliny je přibližně  $1,26 \text{ m}^3/\text{h}$ .



Graf 2: Odchýlení měření při přidání písku a vzduchu (poměr objemů voda:vzduch:písek) Referenční průtok  $1,23\text{m}^3/\text{h}$  samotná směs bez vzduchu,  $0,6\text{m}^3/\text{h}$  průtok směsi + příměs  $0,06\text{m}^3/\text{h}$  vzduchu

Protože písek patří mezi pevné látky, předpoklad měření byl, že dojde ke zvýšení naměřeného průtoku na hmotnostních průtokoměrech. Z přiloženého grafu je možné vidět, že u termického průtokoměru tento předpoklad lze považovat za správný. Hlavním problémem zde lze označit fakt, že jak písek, tak vzduch mají jiný součinitel tepelné vodivosti navzájem i oproti vodě.

Látka	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$ [W/mK]
Voda	0,60
Vzduch	0,0257
Písek	1,5 – 2,7

Tabulka 2: Součinitele tepelné vodivosti pro jednotlivé látky

Při průtoku vody s pískem docházelo k nárazu a usazování částic písku u měřícího čidla. Písek vede teplo lépe než voda. Vyhřívané čidlo předávalo teplo do písku, který má vyšší tepelnou vodivost než voda. Usazené částice byly ohřáty za pomoci prvního čidla a jelikož nedocházelo k jejich pohybu ohřívaly i čidlo druhé. Zvýšením teploty v okolí čidla docházelo ke zvýšení chlazení vodou. Průtokoměr se následně mylně domníval, že průtok je příliš vysoký. U kapaliny bez vzduchu, ale s pískem, došel průtokoměr až do stavu, kdy zobrazoval chybovou hlášku. S příměsí vzduchu se situace sice zlepšila, ale stále se jednalo o vysoké odchýlení. Vzduchové bubliny pomáhaly s čištěním nánosů písku na čidlech. Taktéž má vzduch mnohem nižší součinitel tepelné vodivosti. Tím docházelo k částečnému vyrovnání vlivu písku.

Magneticko-indukční průtokoměr udával téměř totožnou hodnotu pro všechna měření. Z měření se zdá, že písek nemá žádný vliv na naměřenou hodnotu průtoku. Snížení hodnoty průtoku o přibližně 10%, je možné vidět u všech přístrojů kromě termického. Důvodem snížení mohlo být ovlivnění výkonu čerpadla, které nasávalo taktéž písek. Dalším možným vlivem je, že písek trochu omezil vliv bublin v kapalině. Díky tomu průtokoměr nezaměňoval vzduch za kapalinu.

Pokud by byl předpoklad o sníženém výkonu čerpadla mylný, u Coriolisova průtokoměru působil písek podobně jako vzduchové bubliny (v opačném případě neměl žádný vliv). Písek rozptýlený v kapalině se uvnitř oscilující trubice pohyboval v opačném směru. Tím docházelo ke změně amplitudy, a tedy k útlumu naměřeného průtoku. Výsledek se velmi podobal naměřenému rozdílu při měření vzduchu. Pouze odchylka zde byla mnohem vyšší. S přidáním vzduchu docházelo k větší změně amplitudy. Volné bubliny i písek zde společně způsobovaly odchylku, která dosahovala téměř jedné poloviny naměřeného průtoku.

Vírový průtokoměr opět podával nižší naměřenou hodnotu než ostatní průtokoměry. Odchylka zde však byla nejnižší ze všech přístrojů. Písek neměl příliš velký vliv na tvorbu vírů. Částice písku na rozdíl od vzduchu nepohybovaly měřícím pádlem. Měly však nejspíše vliv na vzduchové bubliny a omezovaly jejich vliv na pohyb pádla u průtoku s jejich příměsí.

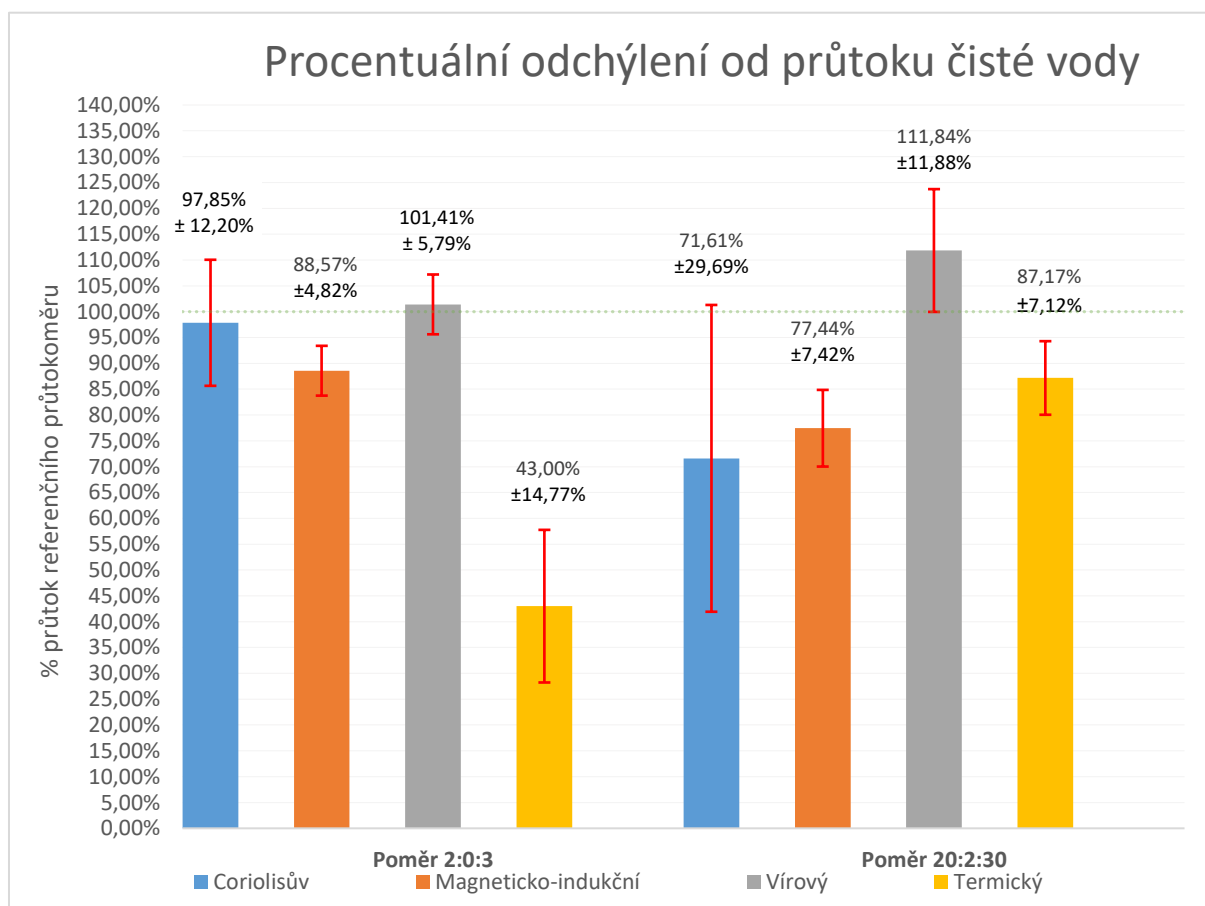
### 5.2.3. Hydroxid vápenatý

Hydroxid vápenatý nebo také lidově „hašené vápno“ se vyrábí z oxidu vápenatého smícháním s vodou. Při hašení dochází k uvolnění velkého množství tepla. Smícháním s vodou vzniká abrazivní tekutina, která poškozuje mnoho kovů. Tato tekutina se poté nazývá podle množství kapaliny vápenná voda, mléko, kaše. Oproti oxidu vápenatému má hydroxid tu výhodu, že v případě míchání s vodou již neuvolňuje teplo. Rozpustnost je taktéž velice závislá na teplotě vody. S rostoucí teplotou rozpustnost klesá viz následující tabulka.

Rozpustnost	Teplota $t$ [°C]
0,17 g / 100ml	0
0,16 g / 100ml	20
0,12 g / 100ml	50
0,11 g / 100ml	60
0,09 g / 100ml	80
0,07 g / 100ml	100

Tabulka 3: Rozpustnost hydroxidu vápenatého na základě teploty

Skutečnost vlivu teploty na rozpustnost měla vliv na průběh měření. Okolní kapalina se během měření zahřívala odpadním teplem generovaným během čerpadla. Měření trvalo přibližně 8 hodin denně. Za tuto dobu se teplota kapaliny zahřála z pokojových 25°C na přibližně 65°C. Původně bylo rozpuštěno přibližně 30kg vápna ve 20l vody. Při pokojové teplotě došlo tedy k úplnému rozpuštění, ale v průběhu času docházelo ke tvoření kašovitých částí.



Graf 3: Odchýlení měření při přidání hašeného vápna a vzduchu (poměr objemu voda:vzduch:vápno) Referenční průtok 1,18m<sup>3</sup>/h čistá směs bez vzduchu, 0,6m<sup>3</sup>/h průtok směsi + příměs 0,06m<sup>3</sup>/h vzduchu

Nejvíce sníženou hodnotu měření v tomto případě dodával Magneticko-indukční průtokoměr. Odůvodnění je zde však jednoduché. Kusy vápenného mléka se usazovaly na měřících elektrodách. Vyšší obsah vápníku v nánosů způsoboval, že konduktivita nánosů byla vyšší než konduktivita zbytku proudící směsi. Tím přístroj konstantně měřil nižší průtok. Velký rozdíl v tomto případě vykazovala také hodnota směrodatné odchylky. Jak bylo zmíněno na začátku, rozpustnost vápna ve vodě klesala s rostoucí teplotou. Měření probíhalo po určité době, kdy čerpadlo běželo již nějakou dobu, a proto stoupla teplota média. V kapalině vznikaly kašovitě kusy, které způsobovaly vyšší odchylku konduktivity. Se vzduchovou příměsí, se rozdíl ještě zvýšily. Rozdíl průtoku a odchylka jsou zde dány vzduchem. Průtokoměr jej stejně jako u předchozích testů považoval za tekoucí kapalinu.

Vírový průtokoměr zde byl ovlivněn ve všech testech. S přidaným vzduchem bubliny i kusy kaše opět pohybovaly měřícím pádlem. Průtokoměr tento pohyb považoval za víry a došlo tedy k mylnému zvýšení naměřeného průtoku. Prakticky se dá však konstatovat, že navýšení hodnoty bylo správné. V danou chvíli opravdu potrubím proudila tekutina o daném objemu. U čistě vápenného mléka se naměřila hodnota vyšší než u ostatních přístrojů. Díky hustším částem kapaliny (kaši) docházelo k pohybu pádla. Tento pohyb stejně jako u vzduchu považoval průtokoměr za vír. Kašovitě kusy tedy napomohly k nejbližšímu přiblížení k referenční hodnotě. Taktéž ale došlo ke zvýšení směrodatné odchylky.

Coriolisův průtokoměr z důvodu měření hmotnosti podával opět rozdílné výsledky než v případě vody. U směsi vápenného mléka bez vzduchu byla hodnota stejně jako u Magneticko-indukčního nižší než u referenčního ultrazvukového průtokoměru. Hustší kusy zde působily spíše rezonančním efektem. Proto došlo u průtoku v určitých částech měření k umělému navýšení, ačkoliv skutečný průtok byl stále stejný. Zvýšená odchylka tuto teorii podporuje. U měření s příměsí vzduchu byla hodnota spíše snížena vlivem vzduchových bublin. I zde však měly vliv kašovitě kusy. Je možné taktéž vidět vysokou sm. odchylku. Ta je dána několika vlivy

- 1) Části kapaliny pouze s volnými bublinami
- 2) Kašovitě kusy tekutiny
- 3) Kusy kapaliny, kde v kašovitě části byly uzavřené bubliny.

Vinou všech vlivů je hodnota velice odlišná od měření čisté vody.

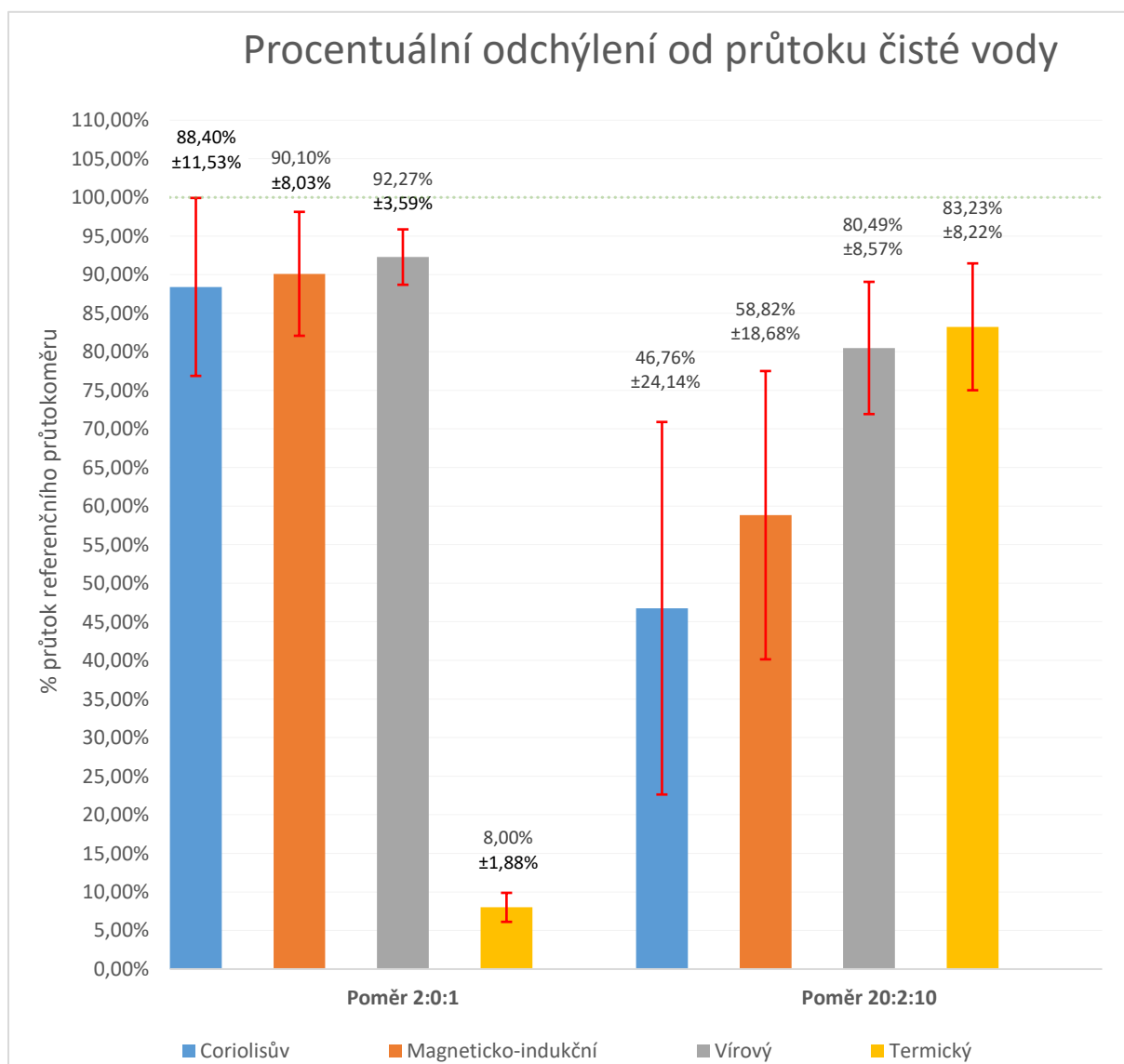
Termický průtokoměr podával i v tomto případě velice rozporuplné výsledky. U čisté kapaliny docházelo k usazování kašovitě části na teplotním čidle. Usazená kaše udržovala více konstantní teplotu na obou čidlech. Průtokoměr tedy chybně vyhodnocoval, že hodnota průtoku byla nižší, než ve skutečnosti. Sm. odchylka je zde dána střídáním situací, kdy se na čidle nacházel velký nános kaše a kdy ne. Vzduch napomáhal ovšem k čištění čidla za pomoci vytvořených bublin. Díky nižší koncentraci vzduchu v proudící kapalině docházelo k tvorbě spíše menších bublin. Tyto bubliny na rozdíl od větších kapes naráží do čidla častěji a s větší intenzitou a nedovolují kašovitě části usadit se. I díky tomu zde měření opět dosáhlo přesnějších hodnot než u Coriolisova průtokoměru. Nižší směrodatná odchylka taktéž podporuje danou domněnku.

### 5.2.4. Kaolín

Kaolín (směs kaolinitu a křemene) je druh horniny, který patří mezi jílové minerály. Jedná se o minerály s velikostí jednotlivých zrn pod  $2\mu\text{m}$ . Samotný jíl mění své vlastnosti s přítomností vody. Bez hydratace se jedná o sypkou látku. Po přidání vody tato sypká látka nabyde na objemu. Rozpustnost jílu není tak dobrá jako u vápna. Při  $20^\circ\text{C}$  je možné rozpustit pouze přibližně  $1\text{mg}/1\text{l}$ . V nádobě bylo smícháno přibližně  $15\text{kg}$  jílu a  $30\text{l}$  vody. Výsledná směs by se dala rozdělit na dvě části.

- 1) Spodní část – Jedná se o směs jílu, která nasákla vodu a vznikla kašovitá část.
- 2) Vrchní část – Tato část obsahovala pouze stopové části jílu

K dosažení nejzajímavějších výsledků bylo čerpadlo uchyceno na rozmezí těchto dvou vrstev. Díky tomu nedocházelo k nasávání čistě kašovité hmoty, která by ucpala čerpadlo. I přes tuto skutečnost však při maximálním výkonu docházelo k přehřívání čerpadla. Toto přehřívání způsoboval nedostatečný průtok. Kalová čerpadla jsou totiž chlazena proudící kapalinou. Pokud tedy není průtok dostatečný, čerpadlo se začne zahřívát a sepne bezpečnostní pojistka proti přehřátí.



Graf 4: Odchýlení měření při přidání jílu a vzduchu (poměr objemu voda:vzduch:jíl) Referenční průtok  $1,07\text{m}^3/\text{h}$  samotná směs bez vzduchu,  $0,6\text{m}^3/\text{h}$  průtok směsi + příměs  $0,06\text{m}^3/\text{h}$  vzduchu



Z příloženého grafu 4 je možné vidět, že u termického průtokoměru se vyskytoval podobný problém jako u měření vápna. Jíl rozpuštěný v kapalině vykazoval vysokou hustotu a viskozitu. Kašovitě části tedy ulpávaly na teplotním čidle. Na přední straně teplotního čidla se tedy tvořil neustálý nános jílu. Tím docházelo k měření pouze na spodní straně (pro představu se dá říci že to bylo jako kdyby se člověk schoval před proudem vody za zdí, která však nezakrývala nohy). Ochlazováním pouze spodní části čidla nemohl být chladící efekt tak účinný. To mělo za následek vysokého podměrování (i přes zohlednění skutečnosti nižšího proudění než u čisté kapaliny). Jediným kladem zde byla nízká hodnota směrodatné odchylky. Ani tato skutečnost však nevylepšila naprosté selhání této metody. Se vzduchovými bublinkami opět došlo ke zlepšení měření. Nárazy vzduchových bublin na vrstvu jílu způsobily její odchlípnutí od stěny čidla. Díky tomu docházelo k poměrně velice přesnému měření. Ze všech průtokoměrů podal v tomto případě nejlepší výsledky.

U vírového průtokoměru byla obě měření velmi podobná. U směsi pouze vody a kaolínu dosáhl nej přesnějších výsledků. S ohledem na složení směsi s vyšší hustotou a viskozitou, než měla voda, výsledek odpovídal skutečnosti. Jílová směs netvořila víry o takové frekvenci jako voda. S přihlédnutím k sm. odchylce je možné vidět, že hodnota průtoku zůstala celkem stálá. U přidaného vzduchu již hodnota nevzrostla tolik jaký byl předpoklad. Díky zvýšené viskozitě neměly vzduchové bubliny takový vliv na měřící pádlo. Pouze velice nízké procento bublin ovlivňovalo svými nárazy měření. Tím došlo pouze k malému zvýšení měřené hodnoty a směrodatné odchylky.

Magneticko-indukční průtokoměr měl během měření kaolínu problém způsobený menším průměrem potrubí. Hustší tekutina se musela během malého úseku vtěsnat z potrubí od DN40 do potrubí s DN8. I přes tuto skutečnost však bylo měření v případě pouze kaolínu s vodou totožné jako na ostatních přístrojích (vyjma termického). Ačkoliv by neměla být hodnota výrazně ovlivněna druhem měřené látky, výsledný průtok vypovídá o opaku. Z důvodu pevných částic se zanášely měřící elektrody. Konduktivita povlaku byla v tomto případě vyšší než konduktivita samotné kapaliny. Tím docházelo k naměření nižšího průtoku než ve skutečnosti. Přidáním vzduchu došlo k ještě většímu rozdílu mezi vodivostí vrstvy nánosů a proudící kapaliny. Sm. odchylka ukazuje, že průtokoměr během měření dostával velmi rozdílné informace. Byly zde chvíle kdy vyšší množství vzduchu způsobilo jeho záměnu za proudící kapalinu. Následně také nižší vodivost vzduchu způsobila sníženou hodnotou naměřeného průtoku. Všechny tyto skutečnosti se promítly do vysoké hodnoty směrodatné odchylky

U měření s Coriolisovým průtokoměrem by se dalo konstatovat, že v modelu opravdu protékalo menší množství tekutiny. Tím, že hodnoty byly velmi podobné, lze říci, že výkon čerpadla se snížil přibližně o 25% oproti měření předchozích látek (získané informace se projevily přesnější korekcí referenčního průtoku). Hustší části působily spíše změnou rezonančního efektu. Vše ovšem záviselo na velikosti. Menší části naopak působily spíše bublinkovým efektem. Pohybem ve stejném směru jako kapaliny došlo ke zvýšení naměřeného průtoku a tím i ke zvýšené hodnotě směrodatné odchylky. U vzduchu docházelo opět ke snížení naměřeného průtoku z důvodu bublinkového efektu. Rozdíl se velmi podobal hodnotám jako v předchozích měření (přibližně 20%). Směrodatná odchylka se opět o část zvýšila. Hlavním důvodem zvýšení byla kombinace částí s hustší tekutinou působící rezonančním efektem a bublin působících bublinkovým efektem.

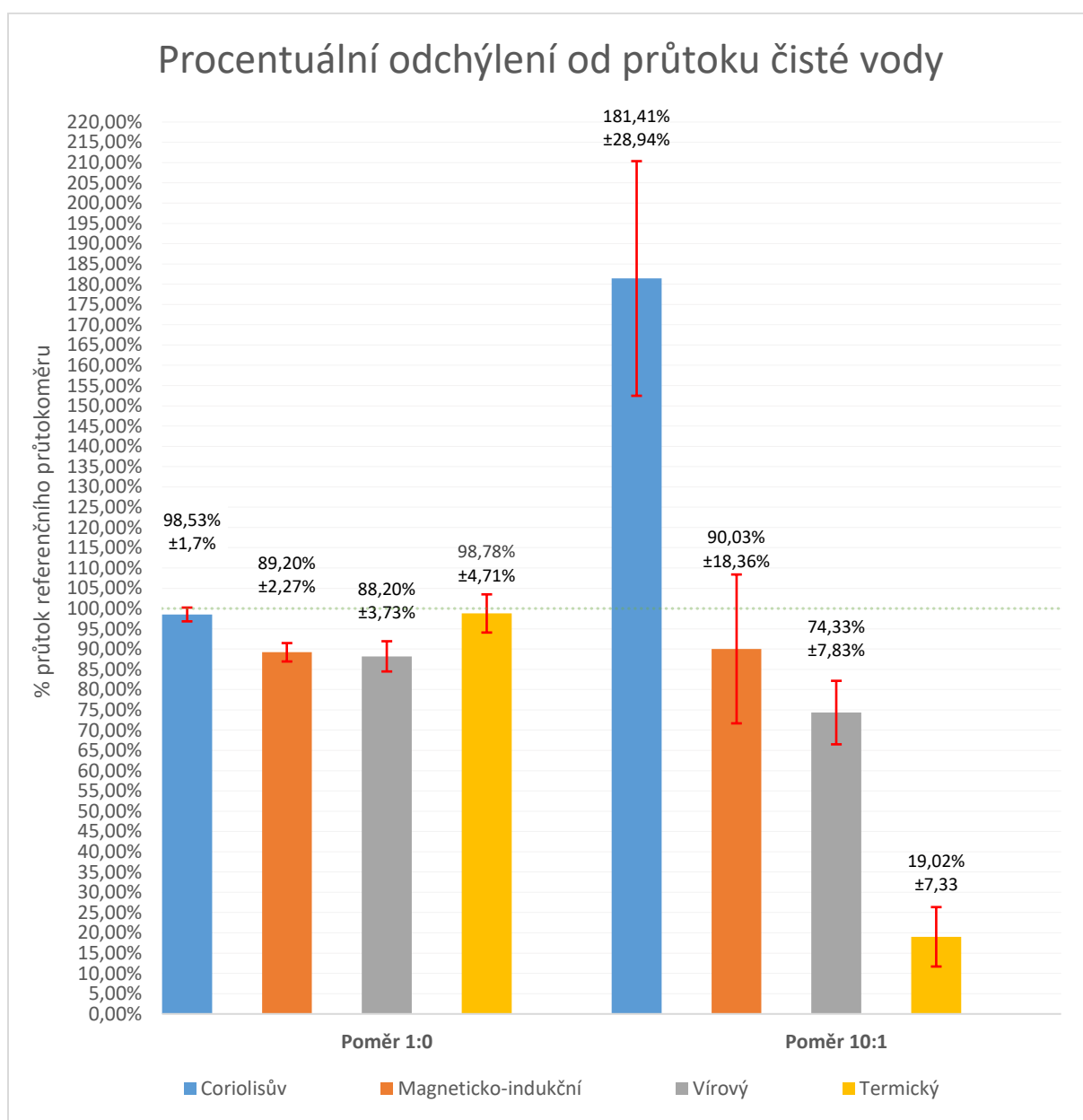
### 5.2.5. Mléko

Mléko je produktem mléčných žláz převážně samic savců (občas dochází k laktaci i u samců). V průmyslu se využívá mnoho druhů mléka od různých savců. Složení jednotlivých druhů mléka je možné vidět v následující tabulce

Druh mléka	Bílkoviny (%)	Tuk (%)	Laktóza (%)	Voda (%)
<b>Kravné</b>	2 – 5	3 – 6	3 – 5	85 – 88
<b>Kozí</b>	3,6 – 3,8	3 – 4	4 – 4,6	85 – 88
<b>Ovčí</b>	5 – 7	7 – 11	3,5 – 4,5	77 – 82

Tabulka 4: Obsah jednotlivých látek podle druhu mléka

V měřeném pokusu bylo využito nejčastěji produkované kravné mléko. Mléko krav je využito pro výrobu základních potravin člověka. Toto mléko je také možné upravovat podle potřeb. Pro testování se využila nejběžnější verze polotučného mléka.



Graf 5: Odchýlení v případě měření mléka a vzduchu (poměr objemu mléko:vzduch) Referenční průtok 1,26m<sup>3</sup>/h čistá kapalina bez vzduchu, 0,6m<sup>3</sup>/h průtok kapaliny + příměs 0,06m<sup>3</sup>/h vzduchu

Protože mléko je téměř z 90% složeno z vody, při testování byly očekávány výsledky velice podobné jako u měření vody. Coriolisův průtokoměr podal u měření čistého polotučného mléka téměř totožné výsledky. Hodnota je pouze o 1,5% nižší. Vysvětlení je jednoduše dáno fyzikálními vlastnostmi. Teplota mléka mezi začátkem a koncem měření se pohybovala mezi 25 – 35°C. Díky tomu byla hodnota viskozity a hustota vyšší než u vody. Pokud by měření probíhalo za vyšších teplot mléka, naměřily by se rozdílné výsledky. Zajímavější hodnoty se objevily v případě měření s příměsí vzduchu. Zatímco u všech předchozích měření docházelo z důvodu bublinkového efektu ke snížení naměřené hodnoty, zde došlo k nárůstu. Hlavním důvodem jsou proteiny (bílkoviny) obsažené v mléce. Vstřikováním vzduchu za přítomnosti bílkovin docházelo ke stabilizaci rozhraní mezi vzduchem a vodou, které musí být stabilní pro adsorpci povrchově aktivních složek tvořených proteiny. Proteiny se následně připojovaly na povrch vzduchových bublin a stabilizovaly je. Normální mléko obsahuje dostatek proteinů na to, aby stabilizovaly vzduchové bubliny a vytvořily pěnu. Obvykle se stabilita pěny postupně snižuje tím, že dochází k vypouštění vzduchu z ní samotné. V uzavřeném potrubí však k této situaci nemohlo dojít. Pěna je tvořena pozastavenými bublinami, proto došlo k převládnutí rezonančního efektu. V některých místech se však objevilo více tekutiny než bublin a z tohoto důvodu se vyskytla zvýšená směrodatná odchylka.

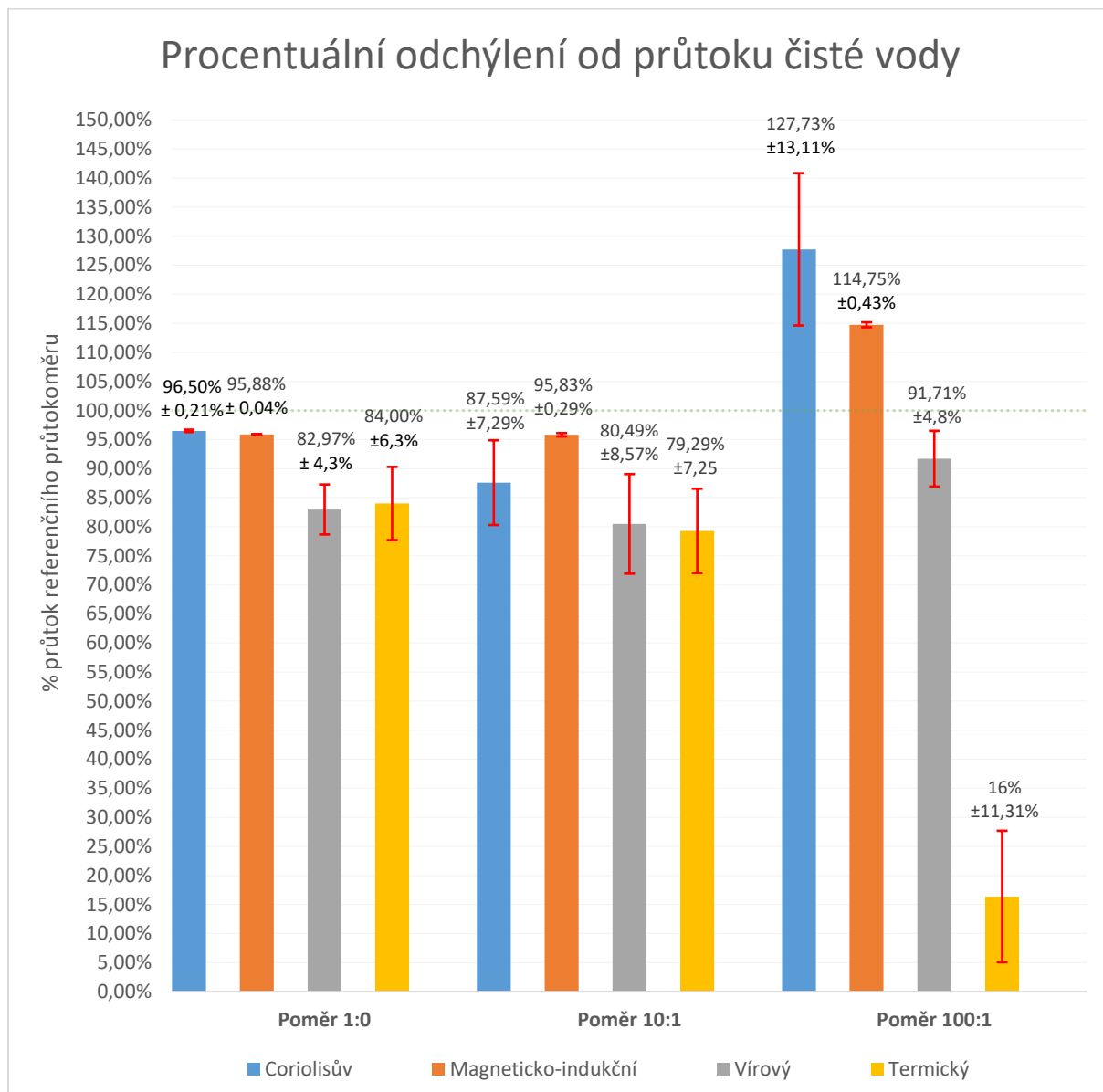
Magneticko-indukční průtokoměr naměřil nižší hodnotu, než bylo předpokládáno. Při kontrole složení mléka je možné vidět, že jednou z nedílných součástí je tuk. Tuková složka se usazovala, stejně jako dříve části jílu, na elektrodách. Usazený tuk měl vyšší konduktivitu než proudící mléko, kde hlavní složkou je voda. Jelikož tuk zůstal permanentně nanesený na elektrodách, měření bylo ovlivněno během celého průběhu. Tím se dosáhla relativně nízká směrodatná odchylka. S přidávkou vzduchu docházelo k ještě většímu nánosu tuku na elektrody. Mléčná pěna, která proudila potrubím měla ještě nižší vodivost než mléko z přechodného měření. Se zvětšeným rozdílem mezi vodivostí kapaliny a vrstvy tuku byl finální naměřený průtok snížen. Neprojevilo se tedy tolik vliv zaměňování vzduchových bublin za kapalinu. Docházelo ovšem k občasnému oddělení nánosu tuku z elektrod čímž se zvýšila hodnota směrodatné odchylky.

U termického průtokoměru došlo k velkému zlepšení oproti měření směsí obsahujících příměsí z pevných látek. Mléko se neusazovalo na měřicím čidle a tím neovlivňovalo teplotu na senzorech. Díky zamezení usazování a ovlivňování teploty na čidle podal termický průtokoměr přesný výsledek. Oproti Coriolisově průtokoměru měl sice zvýšenou hodnotu směrodatné odchylky, ale rozdíl v tomto případě je zanedbatelný. Se vzduchem ovšem nastal opět problém s měřením. Potrubí u termického průtokoměru má větší průměr než u ostatních přístrojů. Protože došlo ke zvětšení prostoru, kde mohla kapalina proudit, oddělila se pěna od kapaliny. Kapalina proudila větší rychlostí ve spodní části potrubí. Pěna naproti tomu tekla v horní části pomaleji. Průtokoměr poté měřil převážně průtok pěny a tím došlo ke snížení naměřeného průtoku i přes nižší hodnotu směrodatné odchylky.

Vírový průtokoměr měl velmi podobné výsledky jako v případě měření čisté vody. Proběhlo zde podobné snížení jako u Coriolisova průtokoměru. Toto snížení bylo již vysvětleno rozdílnými fyzikálními vlastnostmi. Pouze u přidání vzduchu, a tedy vzniku pěny zde docházelo k utlumení pohybu měřicího pádla. Utlumené pádlo nedokázalo správně snímat tvořené víry (pokud opravdu docházelo k jejich tvorbě) a tím se naměřila nižší hodnota průtoku. Ani v jednom případě nebyla hodnota směrodatné odchylky mimo předpoklad.

### 5.2.6. Ovocný sirup

Ovocný sirup je koncentrovaný roztok cukrů ve vodě. Využívají se k výrobě zejména ovocných nápojů. Výroba sirupu je prováděna přidáním cukru do demineralizované vody. Za stálého míchání je tato směs následně povařena. Podle požadavku na koncentraci je následně celá kapalina doplněna vodou, nebo ponechána ve výchozím stavu. Oproti vodě mají sirupy vyšší hustotu a viskozitu. Během testu byly použity sirupy s vyšším obsahem vody. Díky tomu se rozdíly ve viskozitě neprojeví tolik jako u hustších sirupů. Přesný objem vody v sirupu je kolem 40%.



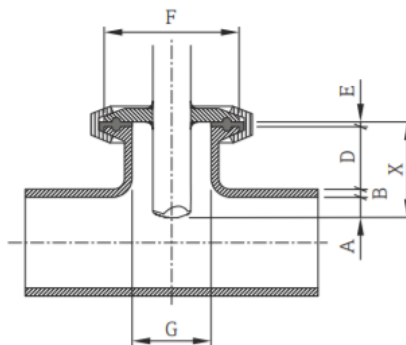
Graf 6: Odchýlen v případě měření ovocného sirupu a vzduchu (poměr objemu sirup:vzduch), Referenční průtok  $1,26\text{m}^3/\text{h}$  čistá kapalina bez vzduchu,  $0,6\text{m}^3/\text{h}$  průtok kapaliny + příměs  $0,06\text{m}^3/\text{h}$  nebo  $6\text{l}/\text{h}$  vzduchu

S ohledem na vyšší viskozitu a hustotu se u všech průtokoměrů opět projevilo snížení výkonu čerpadla. Magneticko-indukční průtokoměr podal u všech měření nejstabilnější výsledky. V případě pouze čisté kapaliny byla sm. odchylka dokonce tak malá, že určený průtok by se dal označit za konstantní. Podobný případ nastal i u průtoku s přidáním 10% složky vzduchu. Na měřicí elektrody se kromě tuků usazovaly i další látky. Jednou z těchto látek byla i cukerná složka v sirupech (vyjma této složky je v sirupech obsaženo i určité stopové množství tuku). Stejně jako v případě mléka měl

nános větší vodivost. To zapříčinilo snížení měřené hodnoty v celém rozsahu měření. Nejzvláštnější případ nastal u vzduchové složky mezi 1 – 3%. Zde došlo k navýšení měřené hodnoty v celém rozsahu. Důvod je velice podobný jako u mléka. Odpadním teplem z běhu čerpadla došlo k zahřátí měřeného média. Ohřáté sirupy na rozdíl od studených měly zvýšenou pěnivost. Látky obsažené v kapalině se přesunuly do proudící pěny, kde se snažily narušit vytvořené bubliny. Tím neovlivňovaly svým nanášením měřící elektrody. Bubliny byly opět mylně zaměněny za proudící kapalinu a tím došlo ke zvýšení naměřeného průtoku.

Vírový průtokoměr podal výsledky dle předpokladu. U čisté kapaliny se naměřená hodnota nacházela opět níže než u ostatních měření. Byla však ještě o něco nižší než předpoklad. Vyšší viskozita a hustota omezila tvorbu vírů. Přístroj přednastavený na vodu očekával víry o jiné frekvenci. Vyjma nižšího průtoku se hodnota sm. odchylky nacházela na stejné úrovni jako u ostatních měření. U směsi s obsahem vzduchu se výsledky opět moc nelišily. Veškeré naměřené hodnoty byly mírně sníženy, ale jinak odpovídaly naměřené látce.

U termického průtokoměru došlo před měřením k úpravě nastavení průtokoměru. K dosažení co nejpřesnějších hodnot proběhla korekce srovnáním s ostatními přístroji. Povedlo se nastavit přístroj tak, aby podával stejnou hodnotu jako Coriolisův průtokoměr (v případě měření vody). Naměřený průtok u sirupu nedosahoval takových hodnot jako u ostatních přístrojů. I přes zvýšenou hodnotu sm. odchylky nemohlo dojít k dosažení správného průtoku ani v jednom naměřeném případě. U 10% plynné složky, na rozdíl od čisté vody, došlo ke snížení naměřeného průtoku. Na vině je opět zvýšená hustota a viskozita. Z důvodu korekce docházelo k usazování částí bublin kolem měřící tyče viz následující obrázek.



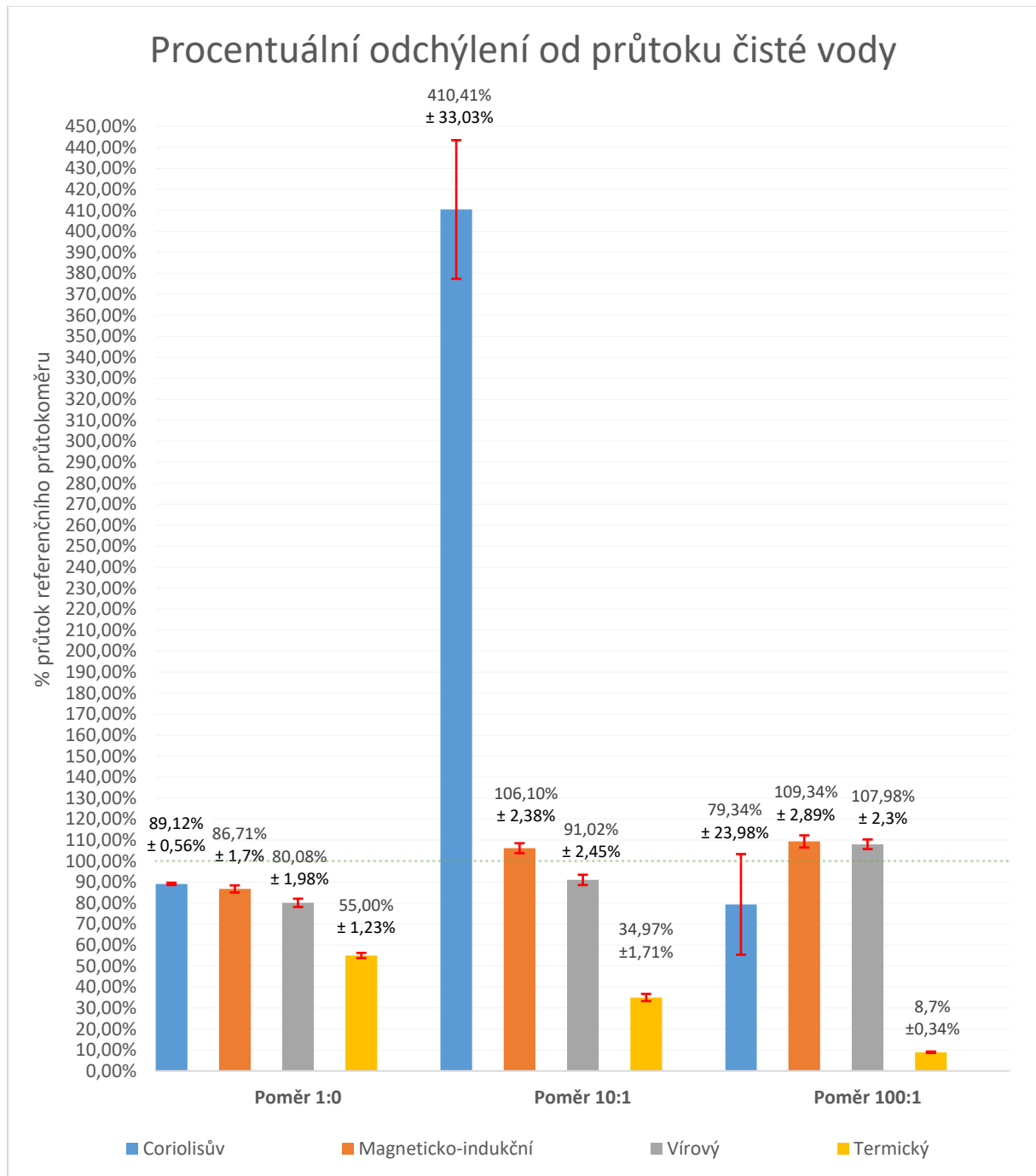
Obrázek 5.2.6.1 Ukotvení termického průtokoměru (t-mass T150)

Protože bubliny se usazovaly na vrchní straně tyče, ovlivňovaly naměřenou teplotu. U sníženého množství vzduchu, kdy se tvořila pěna uvnitř potrubí se tyto rozdíly ještě zvětšily.

S nejpřesnějším Coriolisovým průtokoměrem bylo dosaženo velice dobrých výsledků u čisté kapaliny. Velké rozdíly však nastaly u měření příměsi vzduchu. U 10% objemu se projevila bublinkový efekt. To bylo velice podobné jako v případě vody. Opět zde došlo k oddělení částí s tekutinou a částí s bublinkami což se ukázalo na hodnotě směrodatné odchylky. Nejzajímavější výsledek se objevil u nejnižšího objemu vzduchu. Pěna sirupů se zde opět projevila jako pozastavené bubliny. Protože množství vytvořené pěny nebylo takového jako u mléka, rozdíly nedosahovaly takové úrovně.

### 5.2.7. Směs na zmrzliny

Zmrzliny jsou mražený mléčný výrobek ze směsi smetany nebo mléka, cukru, vajec a dalších přísad. Do testu byla dodána zmrzlina firmy „Bidfood“ s příchutí bílá čokoláda. Jednalo se o kvalitní směs s velkým obsahem mléka a smetany. Uvnitř této směsi se nacházely kousky čokolády. Z testovacího hlediska se jednalo o ideální směs se všemi potřebnými složkami. Měření proběhlo na tekuté, rozpuštěné směsi při pokojové teplotě.



Graf 7: Odchýlen v případě měření směsi na zmrzliny a vzduchu (poměr objemu zmrzlinová směs:vzduch), Referenční průtok 1,18m<sup>3</sup>/h samotná směs bez vzduchu, 0,6m<sup>3</sup>/h průtok směsi + příměs 0,06m<sup>3</sup>/h nebo 6l/h vzduchu

Stejně jako u předchozích měření podal Coriolisův průtokoměr velice rozdílné výsledky. U čisté směsi byl průtok opět nižší z důvodu výkonu čerpadla. Hustota v tomto případě byla téměř o 2/5 vyšší než vody. Velice stálý průtok se projevil taktéž velice nízkou směrodatnou odchylkou. Přidáním vzduchu se však situace velice změnila. Vysoký obsah smetany zapříčinil vysoké našlehání proudící kapaliny. Našlehaná zmrzlina v uzavřeném potrubí se projevila rapidním zvýšením naměřeného průtoku. V tomto ohledu už nedošlo k tvoření pěny s velkými bublinami, ale ke zvětšení objemu s velkým množstvím miniaturních bublin. Pěna jako v ostatních případech ovlivňovala měření rezonančním efektem. Největším problémem však byla skutečnost že již našlehaná směs se nevracela do původního stavu. Nádoba s měřenou látkou se tedy začala velice brzy přeplňovat. Po určité době by došlo až k přetečení okrajů. Naštěstí došlo k zamezení přetečení instalací bezpečnostního víka.



Obrázek 5.2.7.1: Ukázka napěněné kapaliny

S nejnižším poměrem vzduchu ve směsi už nedocházelo k takovému napěnění. Před posledním měřením ale byla odstraněna přebytečná pěna, protože hrozilo nebezpečí přetečení. Tím se odstranila většina složky, která zapříčinila napěnění. V přístroji poté převládá bublinkový efekt a hodnota byla nižší než skutečnost.

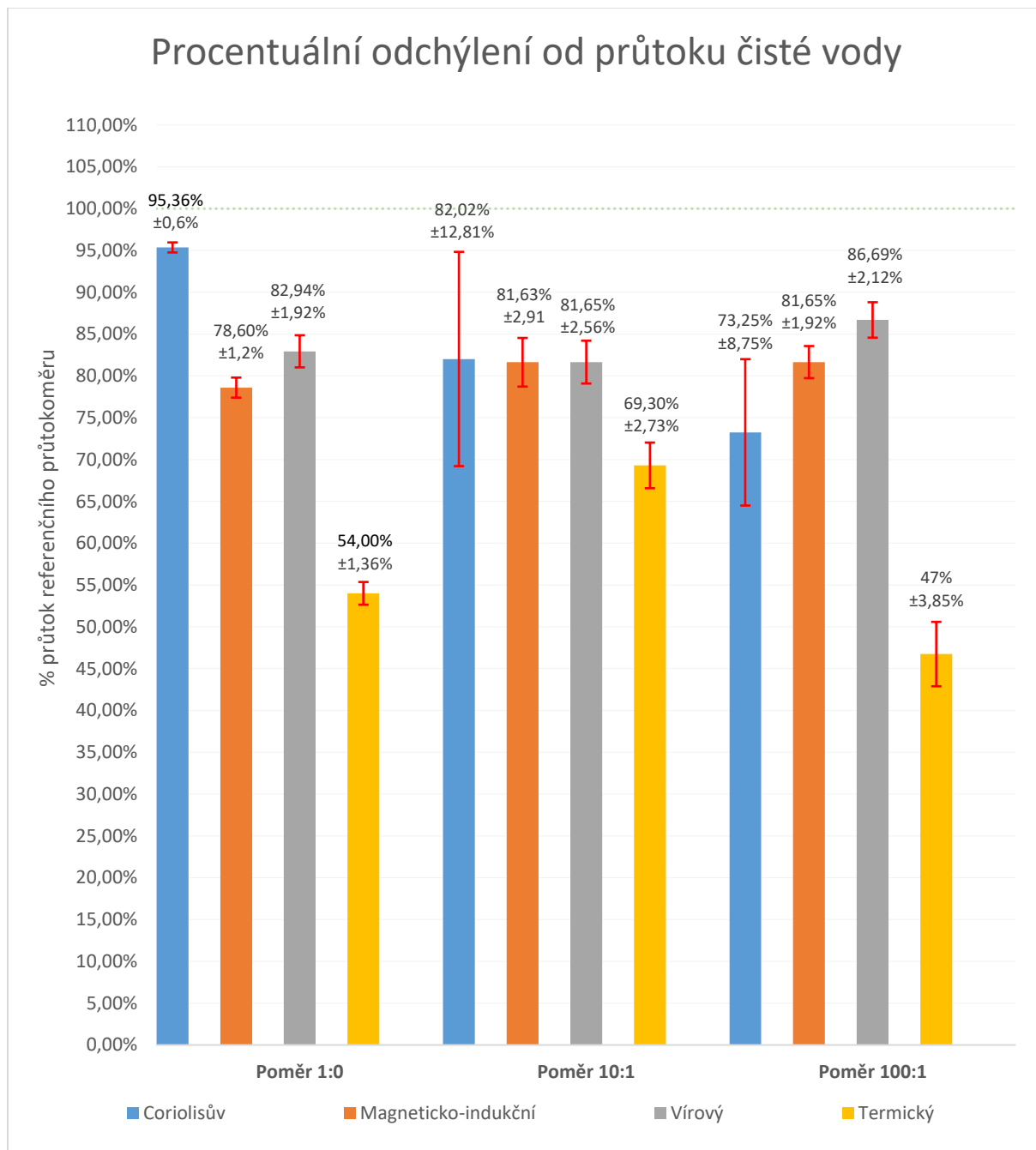
Magneticko-indukční průtokoměr zde byl jen lehce ovlivněn tukem z měřené látky. Výsledky u čisté kapaliny náležely do předpokládaného rozmezí. Jednalo se o částečně rozdílnou hodnotu od Coriolisova průtokoměru. Se vzduchem zde nastala zajímavá situace. Větší množství neovlivnilo přístroj tolik jako menší. V prvním měření utlumila tuková složka měření, jelikož byla více oddělená od pěny. Tím se více nanášela na měřící čidlo. Po měření však byla odebrána část pěny. Odebráním pěny došlo k částečnému vyčištění kapaliny a snížení obsahu tuku. Kapičky tuku narušují stabilitu pěny, protože tuk se chytal na pěnu, kde se jí snažil narušit, již ho v nádobě nezůstalo takové množství. Tím nebyla naměřená hodnota o tolik snížena.

Měření za pomoci termického přístroje v tomto případě opět selhalo. Všechna měření byla velice stabilní díky zlepšenému nastavení průtokoměru. Problém však nastal s přesností určení průtoku. U směsi s obsahem vzduchu by se nepřesnost dala vysvětlit větším průměrem potrubí. V horní části potrubí docházelo k usazování pěny, zatímco dole proudila kapalina.

U vírového průtokoměru nedošlo k žádnému překvapení. Naměřený průtok byl opět nižší než u ostatních přístrojů (vyjma termického). U vyššího poměru zastoupení vzduchu, kdy tvorba pěny byla více intenzivní, nedocházelo k takovému ovlivnění měřicího pádla. Pěna měla odlišné vlastnosti a tvorba vírů měla tedy jinou frekvenci. Frekvence byla v tomto případě vyšší, a proto došlo k zvětšenému určení průtoku. Po odstranění pěny bylo obsaženo více vzduchové složky v tekutině tím se i průtok zvýšil.

### 5.2.8. Lenor SOMMERBRISE

Lenor je prvním zástupcem aviváží. Jedná se o látky pomáhající různým tkaninám proti opotřebením. Látky obsažené v aviváži potahují povrch tkaniny chemickými sloučeninami. Sloučeniny jsou elektricky nabitě a způsobí tím vztyčení vláken na povrchu, čímž se stane tkanina měkčí a jemnější. Taktéž zabraňují hromadění elektrostatických nábojů. Lenor má stejnou hustotu jako voda, v níž je taktéž plně rozpustitelný. Oproti vodě má však stonásobně vyšší viskozitu.



Graf 8: Odchýlení v případě měření Lenoru SOMMERBRISE a vzduchu (poměr objemuLenor:vzduch), Referenční průtok 1,26m<sup>3</sup>/h čistá kapalina bez vzduchu, 0,6m<sup>3</sup>/h průtok kapaliny + příměs 0,06m<sup>3</sup>/h nebo 6l/h vzduchu

Nejpřesnější hodnotu u čistého média podal Coriolisův průtokoměr. Až na sníženou hodnotu průtoku (opět z důvodu výkonu čerpadla) byla hodnota nejpřesnější. Taktéž naměřil nejstabilnější hodnoty na což poukazuje nízká hodnota směrodatné odchylky. U vzduchových bublin nastala



zajímavá situace. S většími bublinami se naměřená hodnota pohybovala blíže skutečnosti než s bublinami menšími. Možných důvodů se zde nabízelo hned několik. S průběhem času došlo k ohřátí kapaliny. Teplejší kapalina nedokázala stlačit bubliny a tím se projevil bublinkový efekt více. Tato možnost dává větší smysl než druhá varianta. Druhou variantou byla možnost že větší bubliny se ve viskóznější kapalině lépe držely v případě oscilací. Z předchozích měření by tato možnost ovšem odporovala již zjištěným informacím. Poslední možnost je založena na informacích ze směrodatné odchylky. Jelikož došlo ke snížení odchylky dá se usuzovat, že bubliny byly více rozptýleny v proudící kapalině. Lepším rozptýlením se ovlivnil celý průběh, proto je hodnota nižší. Snížení může být také jednoduše vysvětleno menším množstvím vzduchu.

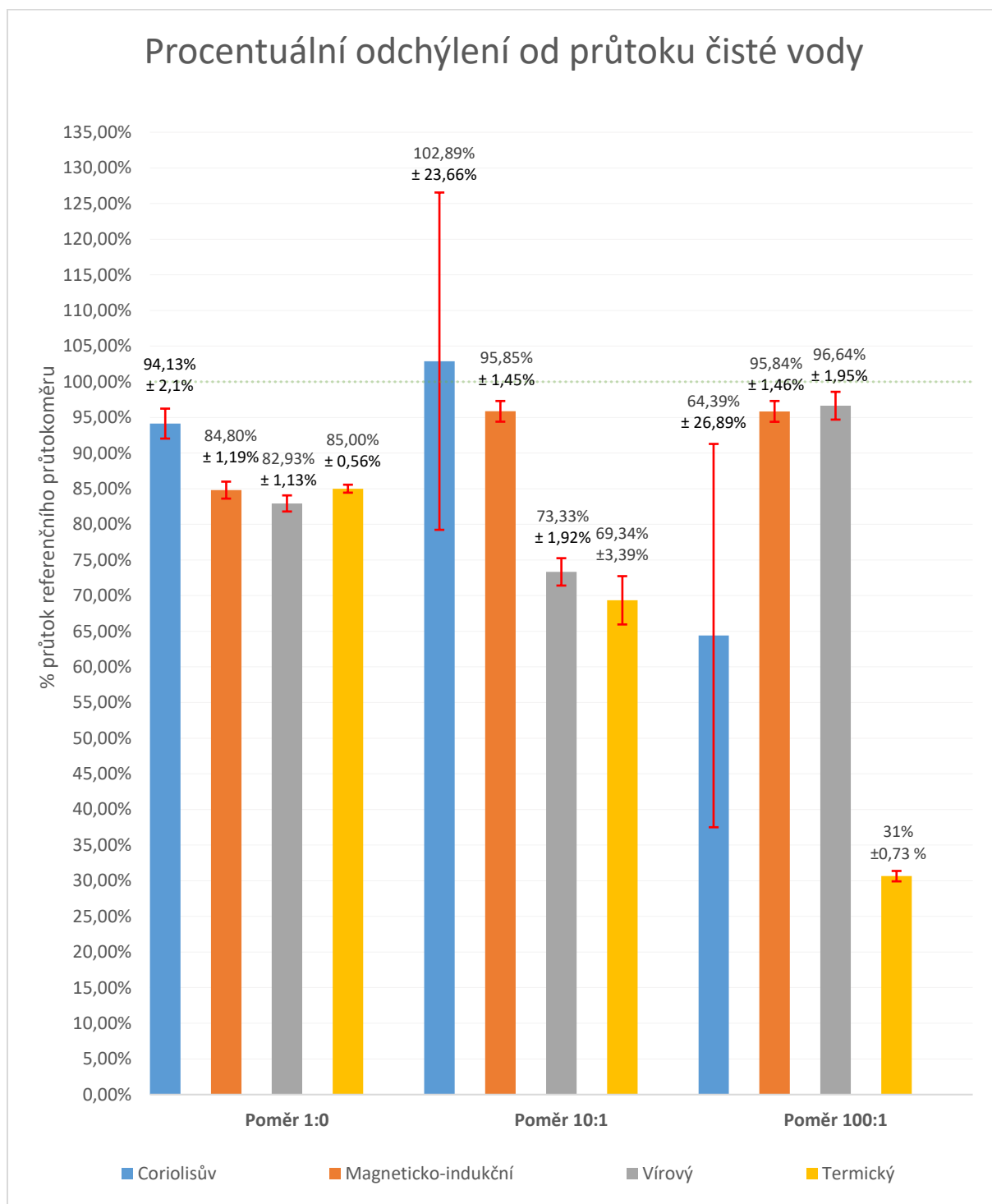
Zajímavé hodnoty vzešly z měření pomocí indukčního průtokoměru. Ve všech stupních měření byla hodnota nižší než u ostatních měření. U čistého Lenoru je snížení dáno složením, jelikož látky obsažené v kapalině mají podobný účinek jako tuky. Velkou složkou uvnitř kapaliny jsou iontové aktivní látky (kationické surfaktanty). Tyto látky jsou přitahovány na zápornou elektrodu, kde zůstávají. Tím že mají mnohem vyšší hodnoty náboje než zbytek kapaliny, dojde k utlumení měřicího principu. I když do kapaliny byl přidán plyn, nedošlo k takovému nárůstu hodnoty jako u ostatních čistých kapalin. Přidáním vzduchu se nejspíše zvětšily rozdíly ve vodivosti kapaliny. Je možné zde pozorovat zvětšení měřeného průtoku, ale pouze v malém rozsahu. Hodnoty průtoku byly v obou případech téměř totožné. Jediným pozorovatelným rozdílem se zdála tedy hodnota směrodatné odchylky. Ta u větších bublin dosahovala vyšších čísel. Příčinou zvýšené sm. odchylky se zde jevila větší koncentrace vzduchu a tím častější zaměňování za kapalinu.

U vírového průtokoměru se projevila zvýšená viskozita měřené látky. U čisté kapaliny byla hodnota snížena dle předpokladu. Oproti Coriolisově průtokoměru se snížený průtok pohyboval o 10% pod správnou hodnotou. Hlavní projev vyšší viskozity se objevil s přidáním vzduchu. Bubliny se zde držely pevně ve směsi s kapalinou. Z toho důvodu neovlivnily pádlo tak jako kdyby docházelo k jejich volnému pohybu. Fungovaly zde tedy stejně jako víry. Pouze byla lehce zvýšena hodnota směrodatné odchylky. S menšími bublinami se jednalo o podobný případ. Hodnota se zvýšila z důvodu zvýšené teploty. Se zvyšující se teplotou se snižovala viskozita tekutiny. Tím docházelo k větším projevům u bublin. I přes sníženou viskozitu a bubliny však nárůst hodnoty nebyl tak drastický jako v jiných případech.

Před měřením byla opět provedena korekce termického průtokoměru. I přes tuto korekci ale průtok nedosahoval takových hodnot, jaké by byly očekávány. Na vině je nejspíše skutečnost, že dříve turbulentní proudění se změnil na laminární z důvodu vyšší viskozity. Bubliny v laminárním proudění více drží směr proudu s tekutinou. Tím docházelo k většímu ochlazení měřicího čidla. Hlavní změnou zde byla tedy přidaná složka vzduchu. Do již ohřáté kapaliny byl přidán vzduch o pokojové teplotě. Tento vzduch narážel více do měřicího čidla a ochlazoval jej, zatímco druhé referenční čidlo ukazovalo teplotu kapaliny. V měření se tedy zdál průtok částečně vyšší, než opravdu byl. S menším množstvím vzduchu už byla kapalina zahřáta natolik, že nedošlo k takovým projevům viskozity. Taktéž menší bublinky nedokázaly ovlivnit tolik měřicí čidlo. Proto je zde hodnota opět nižší.

### 5.2.9. Lenor HYPOALERGEN

Lenor HYPOALERGEN se od prvního testovaného liší svým složením. Protože je cílen na citlivější pokožku obsahuje méně mýdlové složky. Taktéž neobsahuje některé látky, které mohou způsobovat vyrážku. Jeho viskozita je naproti tomu vyšší.



Graf 9: Odchýlen v případě měření Lenoru HYPOALERGEN a vzduchu (poměr objemu Lenor:vzduch), Referenční průtok 1,26m<sup>3</sup>/h čistá kapalina bez vzduchu, 0,6m<sup>3</sup>/h průtok kapaliny + příměs 0,06m<sup>3</sup>/h nebo 6l/h vzduchu

Hlavní vliv rozdílného složení šlo pozorovat na Magneticko-indukčním průtokoměru. Oproti prvnímu testu zde nedošlo k takovému útlumu měření. Iontově aktivní látky se opět usazovaly na

měřicích elektrodách. Jejich náboj však nebyl tak velký jako u normálního Lenoru. Tím došlo pouze k menšímu útlumu než v předchozím testu. Stále však byla hodnota mnohem nižší než u Coriolisova průtokoměru. Se vzduchem došlo ke zvýšení naměřené hodnoty. Stejně jako v ostatních případech zvýšení, byly bubliny zaměňovány za kapalinu. Změna byla oproti průtoku čisté kapaliny přibližně 10%. Se započítáním směrodatné odchylky dosahoval tedy průtok přesně rozdílu přidaného vzduchu. U nižšího poměru však u rozdílu průtoku nenastala změna. Naměřená hodnota se nesnížila tak aby odpovídala přidanému vzduchu. Na vině zde byla viskozita. Opět došlo k zahřátí kapaliny, proto se průtok zvýšil.

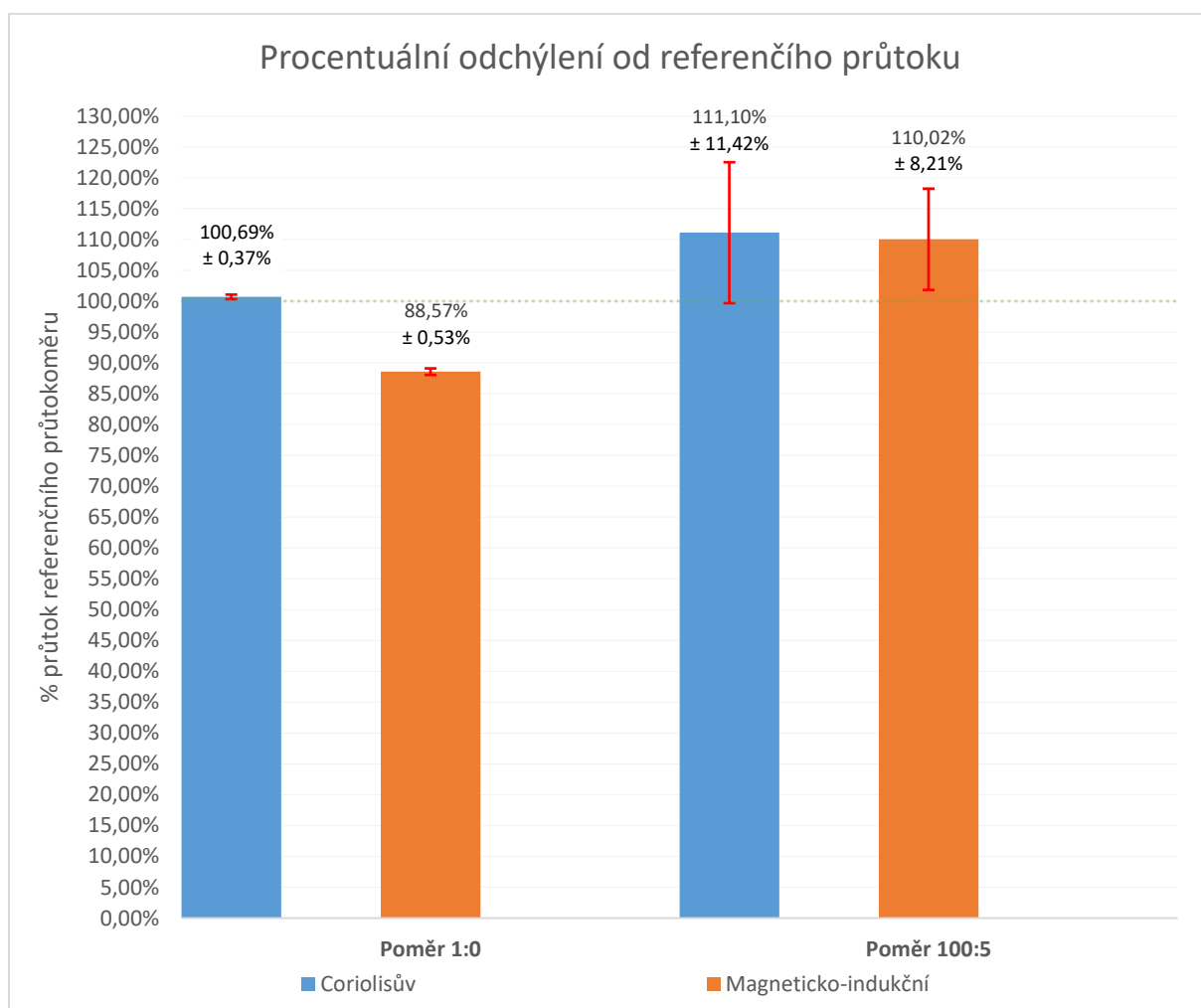
Nejlépeších výsledků dosáhl opět Coriolisův průtokoměr. U čistého Lenoru byl nejbliže k hodnotě čisté vody. Ke snížení opět přispěla viskozita. Z měření čistých kapalin zde však dosahoval nejvyšších hodnot směrodatné odchylky. Zvýšená viskozita se nejvíce projevila u přidaného vzduchu. Bubliny více držely směr kapaliny při oscilacích potrubí. Tím převládl rezonanční efekt a zvedla se hodnota průtoku. Stejně jako u magneticko-indukčního průtokoměru bylo zvýšení přesně v rozsahu přidaného vzduchu. S přihlédnutím k odchylce se dalo zpozorovat, kdy protékal čistý Lenor a kdy v něm pluly bublinky. U posledního měření a projevu zvýšené teploty je případ opačný. Kapalina změnila svou viskozitu vlivem zvýšení teploty. S nižší viskozitou se bubliny pohybovaly proti směru oscilací. Došlo tedy ke snížení naměřené hodnoty. Ani možnost rychlejšího průtoku zde nedokázala pomoci s přesností měření.

Vírový průtokoměr podával opět hodnotu nižší než Coriolisův. Snížení se pohybovalo v rozmezí, které bylo obvyklé pro kapaliny. Kapalina zde protékala velice stabilně. Díky tomu naměřená směrodatná odchylka nedosahovala takové hodnoty jako u ostatních přístrojů. Zajímavé je snížení u bublin. Na vině je několik vlivů, které se spojily dohromady. Ve viskóznější kapalině držely bubliny svou pozici. Nedocházelo tedy k pohybu pádla. Taktéž bubliny bránily tvorbě vírů. Proto došlo ke snížení naměřeného průtoku. V posledním testu už byla teplota natolik vysoká, že kapalina již nedokázala omezit vliv bublin. Díky tomu pohybovaly pádlem a naměřený průtok se zvýšil. Směrodatná odchylka v obou případech se pohybovaly ve velice podobném rozsahu.

Oproti předchozímu Lenoru došlo u Lenoru HYPOALERGEN k výraznému zlepšení při měření s termickým průtokoměrem. U čisté látky byla hodnota velice podobná magneticko-indukčnímu a vírovému průtokoměru. Na rozdíl od ostatních přístrojů měřil více stálou hodnotu, která se projevila nízkou hodnotou směrodatné odchylky. Stejně jako u ostatních přístrojů se zde projevila změna teploty při měření. U prvního testu, kdy bylo přidáno 10% vzduchu, přístroj naměřil hodnotu nižší. Došlo zde sice ke snížení naměřeného množství, ale hodnota je zde blíže než u menšího objemu plynné složky. Na vině je zde stejně jako v ostatních případech viskozita. U prvních testů bubliny pokračovaly potrubím stejně jako kapaliny. Ale se sníženou hodnotou viskozity docházelo k jejich usazování kolem vrchní části měřicího čidla. Tím se změnila vlastnost měření a hodnota již neodpovídala skutečnosti. Směrodatná odchylka dosahující malých čísel tuto teorii podporuje.

### 5.2.10. Jar ultra + Jar sensitive

Jar je saponátový čistící výrobek pro domácnost. Jedná se o čistící látky, které mají vlastnost převádět nečistoty z povrchu do roztoku. Jsou vyráběny převážně z detergentů (chemická látka určená k čištění). Mají lehce vyšší hustotu než voda, ale mnohem vyšší hodnotu viskozity. Hodnota viskozity zde dosahuje 2000cP (příčemž 1cP odpovídá v soustavě SI 1mPa.s). Z tohoto důvodu bylo před měřením jaru nutné upravit model. Dostupná čerpadla na katedře nebyla schopna čerpat takto viskózní kapalinu. Bylo tedy zakoupeno speciální zubové čerpadlo. I toto čerpadlo však mělo problém s čerpáním. Jedinou možností k získání stejného průtoku by bylo předělání modelu. Od tohoto kroku se odstoupilo, jelikož by se jednalo o příliš nákladnou přestavbu. Tlak v potrubí by dosahoval příliš vysokých hodnot a tím by došlo k poškození. Muselo by tedy dojít k přestavění veškerého potrubí a zakoupení speciálního čerpadla. Bohužel je nutné konstatovat, že po měření za dostupných podmínek nedošlo k dosažení použitelných výsledků. Jediné přístroje schopné měřit průtok jaru byly Coriolisův a Magneticko-indukční průtokoměr. Na zbylé průtokoměry byla látka příliš viskózní. U vírového průtokoměru by nedocházelo k pohybu měřícího pádla. Při měření s termickým by zase rychlost průtoku byla natolik nízká, že by se dostal do chybového stavu.



Graf 10: Odchýlení v případě vzduchových bublin v jaru (poměr objemu jar:vzduch), Referenční průtok 0,024m<sup>3</sup>/h

Při měření na zbývajících dvou přístrojích bylo dosaženo velice nízkého průtoku. Přidávání vzduchu zde nebylo potřeba, jelikož čerpadlo samo svým chodem oddělovalo plynnou část od jaru z důvodu kavitace. Při odčerpání části kapaliny bylo zjištěno, že takto vnesená plynná část dosahovala přibližně 5% celkového objemu. Coriolisův průtokoměr dosáhl předpokládaného výsledku. Jelikož se jednalo o

hustší kapalinu došlo k pozastavení bublin a tím se naměřil vyšší průtok, než ve skutečnosti protékal. Magneticko-indukční byl namísto toho ovlivněn mýdlovou částí kapaliny. Tím přístroj podměřoval oproti skutečnému průtoku. U bublin naproti tomu hodnota byla neobvykle zvýšena. Je zde možnost, že objem plynné složky byl vyšší než při odebrání referenčního vzorku.

U Jaru sensitive nebylo měření bohužel již možné. Čerpadlo nebylo stavěno na tak viskózní kapalinu, proto při měření jaru došlo k jeho částečnému poškození. Pokud by měření probíhalo za stejných podmínek, dostalo by se čerpadlo do stavu, kdy by poškození bylo nevratné.

### 5.3. Finální porovnání průtokoměrů

Má-li být popsáno celkové chování průtokoměrů je nutné porovnat výsledky měření podle vlivu, který mají jednotlivé složky. Každý z průtokoměrů reagoval jinak na určitou látku a s ní i příměsí vzduchu. Nelze tedy určit, který přístroj je nejpřesnější. Každý má své výhody a nevýhody.

#### Coriolisův průtokoměr

U čistých kapalin různého složení bude vždy podávat nejpřesnější hodnotu Coriolisův průtokoměr. Jeho hodnota bude vždy nejbližší, díky určování proteklé hmotnosti oproti objemu. Tento přístroj je nezávislý na složení kapaliny, na rozdíl od průtokoměru magneticko-indukčního. Protože trubice osciluje a je ovlivněna pouze hmotností, nedochází k ovlivnění kvůli změně v hustotě (vyjma plynných bublin nebo pevných částic). Taktéž viskozita zde nehraje takovou roli v ovlivnění měřicího principu jako u vírového průtokoměru. Další výhodou je rozsah měření, který není omezen spodní hranicí jako u termického. Oproti ostatním přístrojům jej však velice ovlivňují různé nehomogenity v kapalině. Pokud bude látka obsahovat nečistoty, je přístroj závislý na jejich fyzikálních vlastnostech a velikosti. Pokud jsou tyto nečistoty nerozpustné ve vodě, projeví se ovlivnění na hodnotě směrodatné odchylky. V opačném případě dojde k velkým nepřesnostem. Největší chyby nastávají v případě vzduchu. Jak již bylo zmíněno, u nečistot lze dosáhnout dvou rozdílných efektů. Tyto efekty se projevují zejména v závislosti na viskozitě měřeného média a jeho složení. Jednotlivé jevy se projevují následovně

#### 1) Bublínkový efekt

- a. Méně viskózní média, která neudrží bublinky v případě oscilací. Dochází k pohybu v opačném směru a tím ke snížení naměřeného průtoku. Hlavní projev se zobrazil například u měření Lenoru SOMMERBRIESE
- b. Pevné částice fungují na podobném principu jako bubliny. V případě oscilací se pohybují taktéž v opačném směru a mají stejný efekt. Projev je možné vidět na měření písku.

#### 2) Rezonanční efekt

- a. Hustší části kapaliny jsou díky větší hmotnosti naměřeny jako zvýšený průtok. Hustší části se pohybují při oscilacích stejně jako zbytek a proto přístroj naměří větší hmotnost. Dobrým příkladem je hodnota směrodatné odchylky u měření vápna nebo jílu.
- b. Zvýšená viskozita dokáže potlačit projev bublin v médiu. Bubliny se poté pohybují s naměřenou kapalinou a přístroj zvýší naměřenou hodnotu. U měření jaru je velice dobře vidět projev pozastavených bublin v kapalině.
- c. Speciálním případem je vytváření pěny. Pěna je speciální kombinací vzduchu a kapaliny. Látky obsažené v kapalině (například proteiny, mýdlové části reagující s vodou) obalují vzduchové bubliny vrstvou, která brání jejich projevu v případě oscilací. Médium složené poté převážně ze vzduchových bublin protéká potrubím a je

mnohem lehčí s nimi pohybovat. Dojde tedy ke zvýšení naměřeného průtoku. Tato situace se projevovala zejména u měření veškerých potravin.

### Vírový průtokoměr

Za nejkonzistentnější přístroj se dá považovat vírový průtokoměr. Jedinými kritérii, které ovlivňují jeho měření jsou hodnoty viskozity a hustoty. Je však důležité podotknout, že výsledky se dají interpretovat pouze u vírových přístrojů založených na „DSC“ senzoru. Pokud by byl použit jiný průtokoměr snímající místo pohybů pádla např. změnu tlaku, výsledky by byly velice odlišné. Zde by nečistoty totiž měly vliv na tvorbu vírů a byl by naměřen nižší průtok z důvodu nevytvoření víru. Vliv na tvorbu vírů mají nehomogenity i u „DSC“ senzoru, ale zde pohybují pádlem, čímž je naměřená hodnota zvýšena. Celkový efekt na měření je možné rozdělit do pěti hlavních skupin.

- 1) Příliš vysoká viskozita, kdy není možné měřit, protože se netvoří víry. Dobrou ukázkou bylo měření jaru.
- 2) Zvýšená hodnota viskozity i hustoty kde se netvoří víry s takovou frekvencí. Zde taktéž nedochází k takovým projevům případných nečistot, které by mohly pohybovat měřicím pádlem. Dobrým příkladem bylo měření ovocných sirupů. Zde byla naměřená hodnota nižší než ve skutečnosti. Taktéž se při přidání vzduchu neprojeví bubliny v kapalině. Je nutné podotknout, že relevantní ukázkou je případ s 10% vzduchu. Poté se již kapalina ohřála a změnila se její fyzikální vlastnosti.
- 3) Pokud bude normální hodnota hustoty, ale s vyšší viskozitou, projeví se zde normální tvorba vírů. Díky tvorbě vírů se naměří správná hodnota průtoku. Viskozita však udrží efekt nehomogenit na minimum a tím nedojde ke zvýšení naměřeného průtoku. Tento projev je možné vidět u měření Lenoru.
- 4) U normálních až nižších hodnot jak viskozity, tak hustoty mají nehomogenity vliv na naměřený průtok zvýšením hodnoty. Nečistoty zde naráží do pádla a tím dochází k jeho pohybu. Pohyb je mylně považován za vytvořený vír. Jev bylo možné pozorovat na měření písku v kapalině.
- 5) Speciálním příkladem nezávislým na hustotě a viskozitě je tvorba pěny. Tvorba pěny je závislá na složení měřeného média. Pokud dojde k jejímu vytvoření, nedochází ke vzniku vírů na překážce. Pěna taktéž nepohybuje tolik pádlem jako volné nečistoty. Tím dochází k velkému snížení naměřeného průtoku. Hlavním příkladem bylo měření potravin.

### Magneticko-indukční průtokoměr

Nejvyšší vliv chemického složení bylo možné pozorovat na Magneticko-indukčním průtokoměru. Samotné měření je závislé pouze na magnetické vodivosti měřeného média. Podmínkou v tomto případě byla alespoň minimální vodivost. Nečistoty obecně nemají moc velký vliv na samotné měření. Pouze u vzduchu, který není vodivý dochází často k záměně za proudící kapalinu. Tím dochází ke zvýšení naměřeného průtoku. Problém ovšem nastává v případě, kdy se látky na základě svého chemického složení usazují na měřicích elektrodách. Mezi látky, které se usazují na elektrodách patří například tuky, mýdla, minerály, soli a organické látky. V případě nánosu mohou nastat dvě situace

- 1) Vodivost nánosu je vyšší než vodivost proudící kapaliny. V takovém případě průtokoměr bude konstantně měřit nižší hodnotu průtoku, než ve skutečnosti proudí v potrubí. Během měření se tento jev projevil několikrát. Například u všech potravin, nebo u měření Lenoru.
- 2) Vodivost nánosu je nižší než vodivost kapaliny. Pokud má nános nižší vodivost dochází k opačné chybě. Měřicí elektrody špatně vyhodnotí průtok a budou konstantně měřit vyšší rychlost proudění. V proběhlém měření tato situace nenastala. (Rosemount inc., 1995)

## Termický průtokoměr

U termického průtokoměru je bohužel nutno konstatovat, že ve všech měřeních selhal. Není zde jistota, že naměřené hodnoty jsou pravdivé, jelikož nepodal ani přibližně správnou hodnotu v jakémkoliv měření. Pravdou ovšem je, že problémy byly nejspíše způsobeny větším průměrem potrubí. Taktéž díl na uchycení průtokoměru nejspíše nebyl ideálně vytvořen. I přes veškeré formy korekce byla vždy hodnota nižší, než opravdu proudila potrubím. Veškeré výsledky by se tedy měly považovat za spíše teoretické. Průtokoměr není vhodný na měření látek při výskytu jakýchkoliv nehomogenit. Téměř všechny nečistoty jej ovlivňují. Taktéž je ovlivněn, pokud látky mají zvýšenou hustotu nebo viskozitu. Podle vlastností látek dochází k negativnímu nebo pozitivnímu ovlivnění naměřené hodnoty.

- 1) Pozitivní ovlivnění nastává, pokud nehomogenity obsažené v kapalině zahřívají referenční čidlo. V tomto případě průtokoměr považuje teplotu kapaliny za vyšší, než ve skutečnosti je a zvyšuje se chladící efekt. Následně dochází k falešné kompenzaci zvýšeného chladícího efektu a tím je naměřen vyšší průtok, než ve skutečnosti je. Tento případ nastal například u nečistot v podobě písku.
- 2) Negativní ovlivnění může nastat v několika případech.
  - a. Usazování vzduchu v prostoru horní části měřicí tyče. Dochází tedy ke snížení referenční teploty a tím i k omezení chladícího vlivu. Tato chyba nastala například u měření Lenoru.
  - b. Ulpívání hustších částí na měřicí tyči. V takovém případě opět nedochází k dostatečnému ochlazení, proto je naměřená hodnota nižší než ve skutečnosti. Tento způsob nepřesnosti nastával u měření jílu nebo vápna.

## 5.4. Návrh detekce a korekce chyb

Jelikož případné nečistoty způsobují při měření průtoku v průmyslu problémy a chyby v měření, je třeba vymyslet způsob jejich detekce a případné korekce. Detekce chyb není v tomto případě nikterak složitá. Pro detekci nehomogenit je nejlepší využít Coriolisova průtokoměru. Na rozdíl od ostatních přístrojů dovoluje jeho princip měřit i hustotu kapalin. Všechny druhy nečistot způsobují během měření také změnu naměřené hustoty. Detekci je možné tedy založit na lokální změně hustoty během měření.

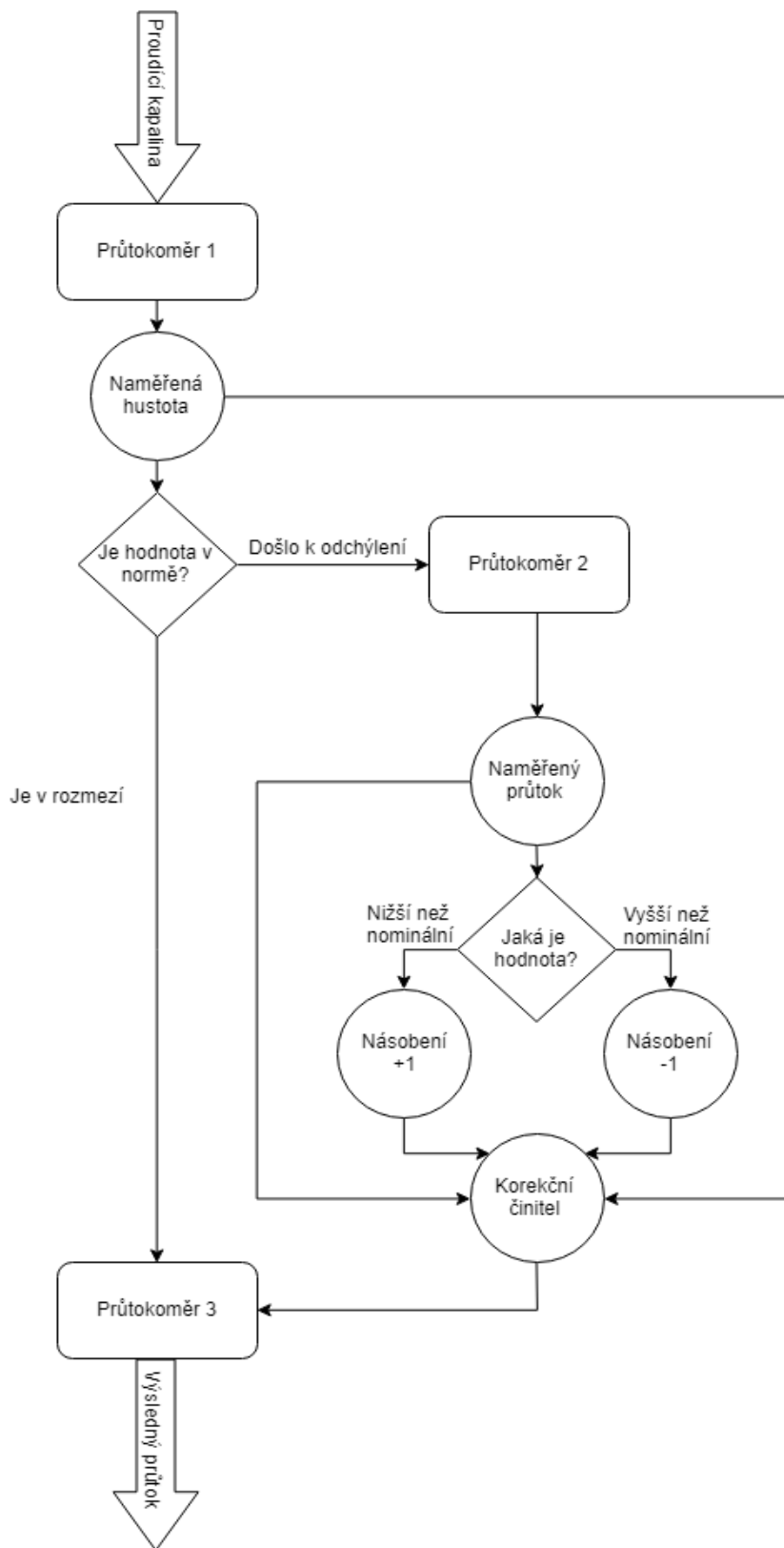
Nejvýhodnější možností pro korekci chyb je využití série průtokoměrů různých typů pro měření stejného média. Problémem zde však je, že každá látka ovlivňuje průtokoměry jinak. Korekce chyb počítá se zavedením korekčního činitele. Ten by byl určen porovnáním výsledků měření ze série průtokoměrů. Nelze však určit sérii (kombinaci typů přístrojů), která by byla v obecném případě nejvýhodnější. Nejlepším návrhem je zde využít větší množství typů průtokoměrů.

Prvním v sérii by byl Coriolisův průtokoměr. Byla by zde naměřena hustota látky. V případě změny hustoty mimo specifický rozsah by došlo k hlášení ostatním přístrojům. Tím by se dala detekovat změna v proudící kapalině a tím i aktivace korekčního činitele.

Druhý přístroj by musel snímat rozdíl oproti nominální hodnotě průtoku. Zde však nastává největší problém. Pro příklad uvažujme opět Coriolisův průtokoměr. Zde při poklesu hustoty nastávají bublinkový a rezonanční efekt. Je nutné určit v jakém rozmezí který z efektů působí. To znamená určení, zda se průtok zvýší, nebo sníží.

Třetí průtokoměr by kombinoval hodnotu zjištěnou z obou předchozích přístrojů s vlastním naměřeným průtokem. Celkově se tedy dá říci, že první dva přístroje určují korekční činitel, který bude použit k opravě průtoku na posledním přístroji.

Pro praktičtější ověření návrhu by však bylo nutné získat nejméně dva Coriolisovi průtokoměry. Nyní dostupné přístroje nedovolují správné otestování. Zatím došlo k testování detekce hustoty, kdy přístroj dokázal hlásit změnu z důvodu vzduchových bublin/pěny. Teoreticky se dala získat i změna na hodnotě průtoku. Bohužel nešlo otestovat celou sérii přístrojů. Návrh je tedy zatím pouze teoretický.



Obrázek 5.4.1: Diagram detekce a korekce nehomogenit



## 5.5. Přestavění modelu pro studenty

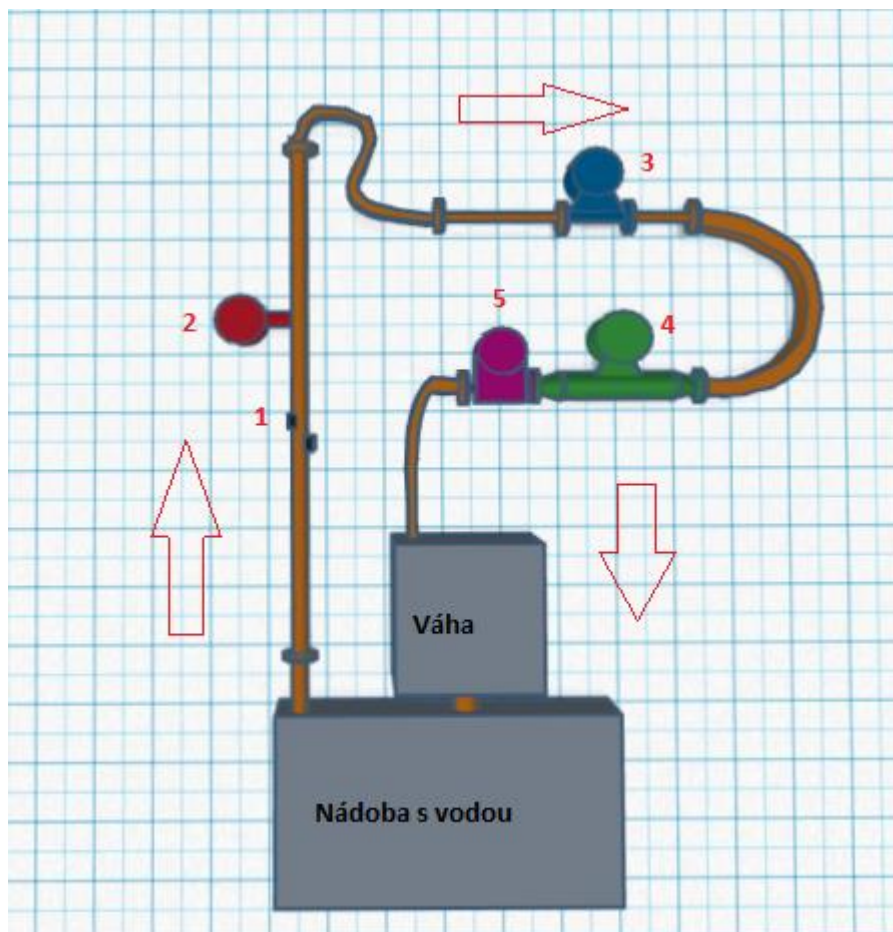
Aby bylo možné model využít v laboratoři pro výuku se studenty, je nutné jej upravit. Po diskuzi s vedoucím práce nakonec bylo rozhodnuto, že zatím nedojde k přestavbě modelu ale pouze k vytvoření návrhu. Nynější model je totiž zatím plně funkční a prozatím vyhovuje pro demonstrační účely. Pro studenty je tedy víceméně dostačující. Pro návrh upraveného modelu byly určeny následující kritéria

- 1) Rozměry, aby se dal sestavit v určené výukové laboratoři
- 2) Odolnost na vnější vlivy a neopatrné zacházení
- 3) Lehká ovladatelnost studenty

Možností na sestavení je zde několik. Na základě proporcí místnosti a volného místa byly určeny dvě nejvíce vyhovující možnosti.

### 5.5.1. Varianta A

První varianta počítá s viditelností veškerého potrubí na stěně laboratoře. Potrubí by v tomto případě bylo vyrobeno z průhledného plastu. Díky tomu by studenti mohli pozorovat pohyb bublin (případně nečistot) v proudící kapalině.



Obrázek 5.5.1.1: Varianta A pro přestavení modelu 1) Ultrazvukový; 2) Termický; 3) Vírový; 4) Coriolisův; 5) Magneticko-indukční; červené šipky určují směr toku kapaliny

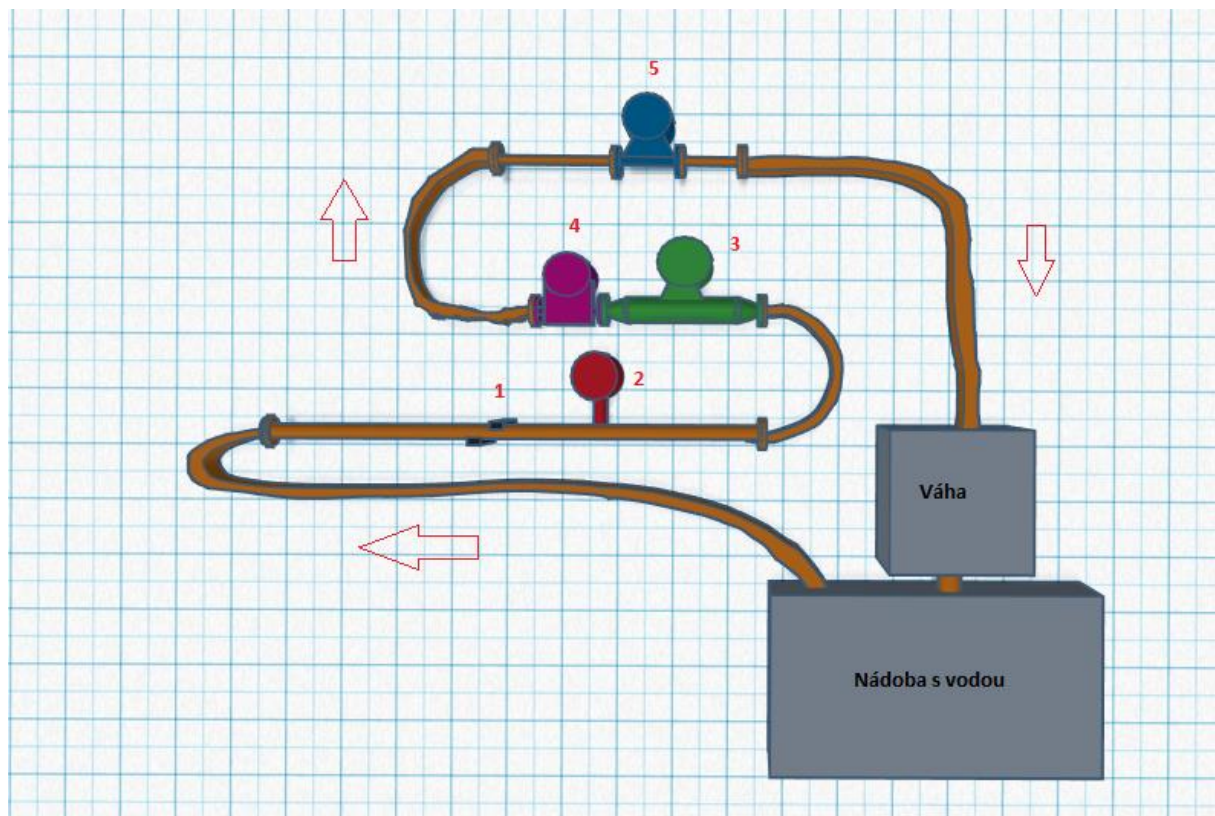
Při pohledu na schéma modelu je možné vidět, že průtokoměry by byly instalovány z části vertikálně a z části horizontálně. Z nádoby a čerpadla by voda směřovala vzhůru. Přibližně 10cm za nádobou by se nacházel T díl, kde by docházelo k přidávání vzduchu. Odtud by voda pokračovala k

potrubí vedoucímu do termického průtokoměru. Na náběžné potrubí s délkou 90cm (které je vyžadováno termickým průtokoměrem) by mohl být připevněn příložný ultrazvukový průtokoměr. Tím by bylo možné ušetřit přibližně 30cm, které by jinak byly potřeba v případě samostatného potrubí pro ultrazvuk. Výhodou je, že délka přívodního potrubí k termickému průtokoměru má dostatečnou délku zároveň na instalaci ultrazvuku. Za termickým průtokoměrem je podle specifikací potřeba další kus potrubí s délkou 30cm. Z tohoto místa je za pomoci hadice voda přivedena k vírovému průtokoměru. Potřebná náběžná délka pro vírový průtokoměr je 40cm a následně je potřeba dalších 20cm za průtokoměrem. Následně opět za pomoci hadice je voda svedena do Coriolisova průtokoměru. Výhodou tohoto přístroje je to, že nepotřebuje žádnou náběžnou délku. Ihned za ním je umístěn magneticko-indukční průtokoměr, který díky menšímu průměru potrubí potřebuje pouze přibližně 5cm náběžné délky. Odtud by byla voda svedena na váhu (pro kalibraci skutečného hmotnostního průtoku) a zpět do hlavní nádoby.

Výhodou zde je, že je možné pozorovat tekutinu po celou dobu jejího průběhu potrubím. Dále je potřeba méně vody pro zaplnění modelu, jelikož veškeré části jsou napojeny bezprostředně za sebou. Nevýhodou je zde ovšem zvýšený tlak a horší možnosti regulace přísunu vzduchu. Dále jsou zde vyšší pořizovací náklady.

### 5.5.2. Varianta B

Druhá varianta počítá se schováním nepotřebných částí potrubí za část statického vybavení laboratoře. Potrubí by v tomto případě nemuselo být průhledné, protože většina jeho délky by stejně byla schována za dalším vybavením laboratoře.



Obrázek 5.5.2.1: Varianta B pro přestavení modelu 1) Ultrazvukový; 2) Termický; 3) Coriolisův; 4) Magneticko-indukční; 5) Vírový; červené šipky určují směr toku kapaliny

Náběžné délky jsou v tomto případě totožné s první variantou. Je zde pouze pozměněno pořadí průtokoměrů.

Výhodou v tomto případě je lepší regulace průtoku vzduchu a nižší cena. Tlak je zde také nižší, jelikož čerpadlo nemusí čerpat vodu do takové výšky. Nevýhodou ovšem je, že studenti nemohou tak snadno pozorovat průběh kapaliny a je potřeba více kapaliny pro zaplnění a chod celého modelu.

## 5.6. Návrh laboratorní úlohy

Návrh úlohy počítá s využitím velice podobného zadání, jako je použito na nynějším výukovém modelu. Díky možnosti ovlivnění za pomoci vzduchových bublin by zde pouze přibyl další bod měření. Základní znění i s domácí přípravou by bylo následovné.

**Domácí příprava:** Vysvětlete, na jakém principu fungují libovolné dva použité průtokoměry (Vírový, Ultrazvukový, Termoanemometr, Magneticko-indukční, Coriolisův, Rotametr). Jaký je rozdíl mezi měřením objemového a hmotnostního průtoku? Z jakého důvodu může vzduch ovlivnit měření průtoku vody?

### Zadání

- 1) Alespoň pro tři různé hodnoty průtoku stanovte statickou charakteristiku všech použitých průtokoměrů. Jakožto referenční hodnotu použijte hmotnostní průtok zjištěný za pomoci vah a stopek.
- 2) Změřte citlivost přístrojů na chybu vyvolanou vzduchem. Podobně jako v bodě 1) použijte referenční hodnotu z vah.

### Postup měření

Spusťte měřicí aplikaci a navolte požadovaný průtok. Po spuštění čerpadla vyčkejte, než začne protékat voda do nádoby na váze. Ve chvíli, kdy již voda vtéká do nádoby, je model připraven k měření. Na váze nastavte počáteční hodnotu např.  $15\text{ kg}$  a zmáčkněte tlačítko „zero“ na předním panelu stopek. V měřicí aplikaci nastavte jednotlivé přístroje na správné adresy a odsouhlaste měření. Podržte vahadlo vah, aby nepřikývlo vzhůru a zazátkujte výtok kapaliny. Jakmile dosáhne hmotnost nádoby a kapaliny nastavené hodnoty, vahadlo se pohne a spustí se stopky. Nyní podržte vahadlo v dolní poloze a nastavte novou hodnotu (například  $20\text{ kg}$ ). Jakmile po chvíli hmotnost opět dosáhne požadované hodnoty, dojde k opětovnému pohybu vahadla a stopky se zastaví. Na stopkách zůstane zaznamenaný čas potřebný k průtoku určené hmotnosti kapaliny. Odzátkujte nádobu a nechte kapalinu vytéct zpět do rezervoáru. Zastavte měřicí aplikaci, vynulujte stopky a zopakujte kroky pro další hodnoty průtoku.

Pro měření vlivu přimíchaného vzduchu na měření průtoku vody je potřeba nastavit průtok vody na přibližně  $600\text{ l/h}$ . Spusťte vzduchové čerpadlo a za pomoci rotametru nastavte požadované množství vzduchu. Počkejte, než vzduchové bubliny začnou protékat až do nádoby na váze. Pokračujte totožně jako při měření čisté kapaliny.

## 6. Závěr

Cílem této práce bylo určit chování jednotlivých průtokoměrů při měření různých vícefázových směsí. Aby to však bylo možné, bylo nutné sestavit experimentální pracoviště a naprogramovat měřicí aplikaci. Byly zvoleny směsi látek o různých skupenstvích a z různých odvětví průmyslu. Získané a testované látky se dají rozdělit do tří skupin: Pevné látky jako příměsi ve vodě (např. písek), potraviny (např. mléko) a čisticí prostředky (např. saponát).

První část práce byla zaměřena na automatizaci měřicího modelu. Předchozí model byl svou konstrukcí nevhodný pro testování většího množství látek a přístrojů. Pro ulehčení práce došlo k vytvoření aplikace, která zvládá jak záznam naměřených hodnot, tak regulaci průtoku ovládním čerpadla. Celá aplikace byla naprogramována v programu LabView. K záznamu dat byl využit měřicí převodník NI USB-6009 od firmy National Instruments. USB převodník dokázal zaznamenávat pouze hodnoty napětí. Průtokoměry však vysílaly měřené hodnoty ve formě proudové smyčky. Došlo tedy k sestavení pomocného obvodu, který za pomoci odporů převáděl hodnoty proudu na měřená napětí. Výsledná aplikace dokázala velice přesně zaznamenat průtoky a zapsat údaje do souboru. Regulační část byla vyrobena za pomoci servo-motoru, který ovládal autotransformátor. Výhodou tohoto robustního řešení byla možnost ovládat větší množství čerpadel v případě jejich výměny.

Druhá část práce byla zaměřena na samotné měření a popis chování průtokoměrů v reakci na nehomogenitu média. Většina látek ovlivnila výkon čerpadla. Jelikož se jednalo o známý fakt, byla jako vztažná (tj. nominální průtok 100%) využita hodnota z referenčního průtokoměru. Po celou dobu měření byl jakožto referenční průtokoměr použit ultrazvukový přístroj. Díky tomu bylo možné určit kdy byla chyba měření vyvolána sníženým výkonem. V takovém případě byl referenční průtok snížen.

Naměřené chyby na přístrojích byly velice závislé na fyzikálních vlastnostech testované směsi. Termický průtokoměr byl velice ovlivněn veškerými pevnými/plynnými látkami nebo směsmi s vysokou viskozitou. V takové případě totiž docházelo k usazování látek kolem měřicí tyče, čímž došlo k ovlivnění teploty a narušení měřicího principu. Magneticko-indukční průtokoměr byl ovlivněn v případě látek, které se nanášely na měřicí elektrody. Nános zde vždy utlumil měření a tím přístroj měřil nižší hodnoty průtoku. Vírový průtokoměr zvyšoval naměřený průtok, pokud látky pohybovaly pádlem snímajícím víry. Mezi takové nehomogenity patřily bubliny nebo pevné látky. V případě viskóznějších směsí nedocházelo k takové tvorbě vírů a tím i ke snížení naměřeného průtoku. Coriolisův průtokoměr byl velice nezávislý na fyzikálních vlastnostech kapalin. U nehomogenit, které se nerozpouštěly v kapalině se však chyba zvyšovala. Nejvyšší vliv se projevoval u vzduchu. Pokud látka dovozovala na základě svého složení tvorbu pěny došlo ke zvýšení průtoku. V opačném případě byl naměřený průtok vždy snížen.

Na základě naměřených dat byl navržen způsob detekce a korekce. Návrh počítal s využitím série Coriolisových průtokoměrů. První dva přístroje by zaznamenávaly chyby na naměřené hustotě a průtoku. Spojením těchto hodnot by byl vytvořen korekční činitel. Metoda však nebyla ověřeno, protože byl k dispozici pouze jeden Coriolisův průtokoměr.

Přestavení modelu bylo odloženo a byly pouze navrženy dvě varianty pro přestavbu. Z těchto variant vycházel taktéž návrh pro laboratorní úlohu. Navržená úloha představuje téma měření průtoku a vícefázového průtoku studentům.

Závěrem práce lze konstatovat, že všechny úkoly zadání byly splněny. Na přiložených grafech je možné vidět, že nehomogenity určitým způsobem ovlivňují všechny přístroje. V průmyslu je možné detekovat nehomogenity uvnitř kapaliny. Navržený postup korekce je možné v praxi využít. Je však nutné určit korekční činitel, aby odpovídal vlastnostem jednotlivých látek.

## 7. Zdroje

Altendorf M., Cossy A., Staudt W. a další, Flow Handbook, Endress+Hauser Flowtec AG, Reinach/BL Švýcarsko 2006, 3.vydání, ISBN: 3-9520220-4-7

Barták M., Úvod do přenosových jevů pro inteligentní budovy [online], ČVUT v Praze, Praha 2010, [cit. 19.5.2019] dostupné z: <https://docplayer.cz/33812217-Uvod-do-prenosovych-jevu-pro-inteligentni-budovy.html>

Conductivity, Salinity & Total Dissolved Solids [online], [cit. 19.5.2019] dostupné z: <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/conductivity-salinity-tds/>

Ďaďo S., Bejček L., Platil A., Měření průtoku a výšky hladiny, BEN-technická literatura, Praha 2005, 1.vydání, ISBN: 80-7300-156-X

Deriánová K., Fiedler J., Kaufman J., Nenevtonovské kapaliny [online], ČVUT v Praze, Praha 2009, [cit. 19.5.2019], dostupné z: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2009-2010/Zima09/proc/nenewt.pdf>

Dielectric properties [online], [cit. 19.5.2019] dostupné z: <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/dielectric-properties/>

Grisso R., Soil Electrical Conductivity [online], [cit. 19.5.2019] dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/e88b/d71059c64b1dac601981c439aa9708993abf.pdf>

Hájek M., Bakalářská práce [online], ČVUT v Praze, Praha 2017, [cit. 19.5.2019], dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68368/F3-BP-2017-Hajek-Michal-Porovnaní\\_prutokomeru\\_pri\\_mereni\\_vicfazovych\\_smesi.pdf?sequence=1&isAllowed=y#page=50&zoom=100,0,94](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68368/F3-BP-2017-Hajek-Michal-Porovnaní_prutokomeru_pri_mereni_vicfazovych_smesi.pdf?sequence=1&isAllowed=y#page=50&zoom=100,0,94)

Herrmann M., přednáškový materiál: Two-Phase Flow tutorial [online], Stanford University, Stanford 2006, [cit. 19.5.2019] dostupné z: <https://web.stanford.edu/group/ctr/SummerProgram/TwoPhaseTutorial.pdf>

Kadlec K., Kmínek M., Kadlec P. a kolektiv, Měření a řízení v potravinářských a biotechnologických výrobcích, KEY Publishing, Ostrava, 2015, ISBN 978-80-7418-232-7

Kavitace, 2019, [online], poslední revize 14.1.2019 [cit. 19.5.2019], dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/w/Kavitace>

Kuphaldt T.R., Basics of Hydrostatic Level Measurement, [online], [cit. 19.5.2019] dostupné z: <https://instrumentationtools.com/basics-of-hydrostatic-level-measurement/>

Rosemount inc., Magnetic flowmeter fundamentals [online], Chanhassen 1995, [cit. 19.5.2019], dostupné z: <https://www.automaatika.ee/pdf/Fundament.pdf>

Siauve N., Scorreti R., Nicolas L., a další, Electromagnetic fields and human body: a new challenge for the electromagnetic field computation [online], [cit. 19.5.2019] dostupné z <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00140339/document>

Sugar Solutions-Viscosities [online], [cit. 19.5.2019] dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/sugar-solutions-dynamic-viscosity-d\\_1895.html](https://www.engineeringtoolbox.com/sugar-solutions-dynamic-viscosity-d_1895.html)

## Kapitola 7. Zdroje

Snášelová J., Motyčková M., Zikán V., Hustota mléka a smetany v závislosti na teplotě a obsahu tuku [online], [cit. 19.5.2019] dostupné z:

[http://www.mlekarskelisty.cz/upload/soubory/pdf/2009/113;114\\_s.18-21.pdf](http://www.mlekarskelisty.cz/upload/soubory/pdf/2009/113;114_s.18-21.pdf)

Technical Information Proline Prowirl F 200, TI01084D/06/EN/05.15 71299457 [online], [cit. 19.5.2019] dostupné z:

[https://portal.endress.com/wa001/dla/5000664/1982/000/04/TI01084DEN\\_0515.pdf](https://portal.endress.com/wa001/dla/5000664/1982/000/04/TI01084DEN_0515.pdf)

Technical Information Proline Promass 80/83 H, I, TI052D/06/en/11.05 71008418 [online], [cit. 19.5.2019] dostupné z:

<https://portal.endress.com/wa001/dla/5000000/0162/000/02/TI052DEN.pdf>

Technical Information Proline Prosonic Flow 93P, TI00083D/06/EN/13.11 71136721 [online], [cit. 19.5.2019] dostupné z:

[https://portal.endress.com/wa001/dla/5000254/2996/000/02/TI00083DEN\\_1311.pdf](https://portal.endress.com/wa001/dla/5000254/2996/000/02/TI00083DEN_1311.pdf)

Technical Information Proline Promag 50H, 53H, TI00048D/06/EN/14.16 71318126 [online], [cit. 19.5.2019] dostupné z:

[https://portal.endress.com/wa001/dla/5000319/0453/000/07/TI00048DEN\\_1416.pdf](https://portal.endress.com/wa001/dla/5000319/0453/000/07/TI00048DEN_1416.pdf)

Technical Information Proline t-mass T 150, TI01127D/06/EN/01.13 71237449 [online], [cit. 19.5.2019] dostupné z:

[https://portal.endress.com/wa001/dla/5000319/0453/000/07/TI00048DEN\\_1416.pdf](https://portal.endress.com/wa001/dla/5000319/0453/000/07/TI00048DEN_1416.pdf)

VŠCHT, Měření průtoku a proteklého množství, [online], [cit. 19.5.2019], dostupné z:

<http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/F4/F4k45-prut.htm>

Zhu H., Rieder A., Lin Y., An Innovative Technology for Coriolis Metering under Entrained Gas Condition, [online], Sydney 2016, [cit. 19.5.2019], dostupné ke stažení z:

[https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUK Ewi11sG1p\\_7TAhWI\\_SwKHW2-B\\_QQFggtMAE&url=http%3A%2F%2Fmetrology.asn.au%2Fflomeko2016%2Fpapers%2F57b176fe560bd-Flomeko2016-Coriolis-EntrainedGas-Zhu.docx&usg=AFQjCNHBuAoeOtS4CZdswkj1xYupWDsYRw&sig2=Nb4cKe12o7JxJzuzfzCYf-g](https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUK Ewi11sG1p_7TAhWI_SwKHW2-B_QQFggtMAE&url=http%3A%2F%2Fmetrology.asn.au%2Fflomeko2016%2Fpapers%2F57b176fe560bd-Flomeko2016-Coriolis-EntrainedGas-Zhu.docx&usg=AFQjCNHBuAoeOtS4CZdswkj1xYupWDsYRw&sig2=Nb4cKe12o7JxJzuzfzCYf-g)

## Seznam příloh

Příloha 1: Maximální chyby přístrojů specifikované výrobcem-Grafy

Příloha 2: Základní nastavení (LabView program)

Příloha 3: Nastavení ukládání souboru (LabView program)

Příloha 4: Finální program (LabView program)

Příloha 5: Enumenátor (LabView program)

Příloha 6: Ovládání servomotoru (LabView program)

Příloha 7: Ukázka naměřených dat

Příloha 8: Bezpečnostní list Jar (Fairy) - Anglický dokument

Příloha 9: Bezpečnostní list LENOR Sensitive (Hypoalergen)

Příloha 10: Bezpečnostní list Lenor Summer