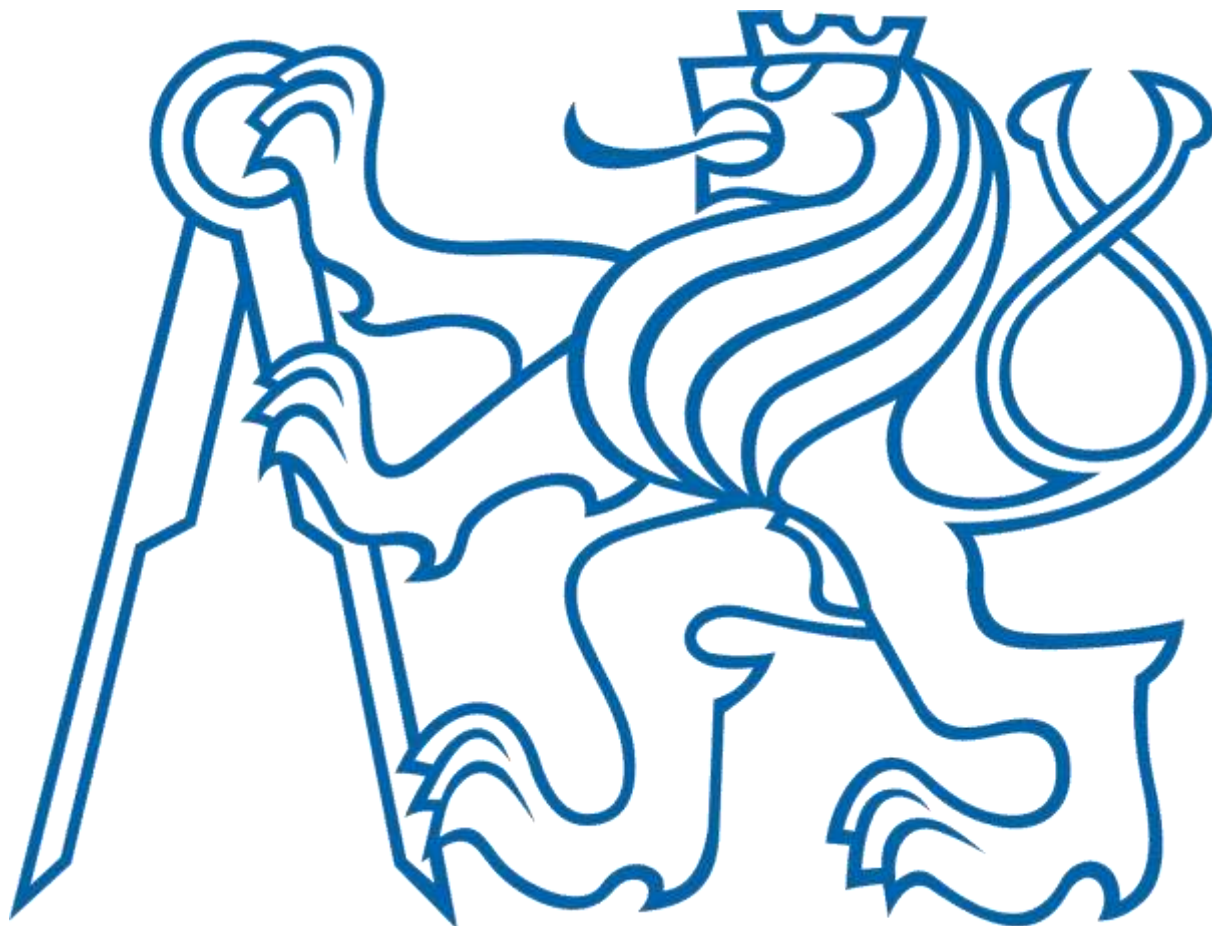


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ



Bakalářská práce

Porovnání průtokoměrů při měření vícefázových směsí

Praha

Červen 2017

Autor: Michal Hájek

Vedoucí práce: Ing. Bc. David Slepíčka PhD. MBA



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Michal Hájek**

Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Obor: **Senzory a přístrojová technika**

Název tématu česky: **Porovnání průtokoměrů při měření vícefázových směsí**

Název tématu anglicky: **Comparison of Flowmeters for the Measurement of Multi-phase Mixtures**

Pokyny pro vypracování:


Cílem bakalářské práce je porovnání chování a přesnosti měření různých druhů průtokoměrů kapalin v režimu měření vícefázových směsí (kapalina + vzduch + pevné částice). Pro vytvoření experimentálního modelu budou použity různé typy průtokoměrů (Coriolisův, vírový, ultrazvukový, magneticko-indukční) zapojené v sérii na společném potrubí.

1. Navrhněte a sestavte funkční model se zásobníkem vody, čerpadlem a několika běžnými měřicími principy průtokoměrů pro měření médií složených z kapaliny a přídavného vzduchu nebo pevných částic. Model koncipujte s ohledem na snadné použití v laboratorních podmínkách katedry, aby byl použitelný i jako předmět studentských měření v předmětech katedry. Navrhněte také způsob určení nebo měření příměsí kapaliny a způsob přenosu a záznamu měřených dat.
2. Pro vybraná různá složení směsí kapaliny se vzduchem nebo pevnými částicemi změřte, vyhodnoťte a porovnejte chování jednotlivých měřicích principů.

Seznam odborné literatury:


- [1] Ďaďo, S., Kreidl, M.: Senzory a měřicí obvody, Vydavatelství ČVUT, Praha 1999.
- [2] Kadlec, K., Kmínek, K., Kadlec, P.: Měření a řízení v potravinářských a biotechnologických výrobcích. Vydavatelství KEY Publishing, Ostrava 2016.
- [3] Dokumentace průtokoměrů firmy Endress+Hauser, případně dalších.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Bc. David Slepíčka, Ph.D. MBA (Endress+Hauser)
Datum zadání bakalářské práce: 18. ledna 2017
Platnost zadání do¹: 30. září 2018


Doc. Ing. Jan Holub, Ph.D.
vedoucí katedry



V Praze dne 18. 1. 2017


Prof. Ing. Pavel Řípka, CSc.
děkan

¹ Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu Ing. Bc. Davidu Slepíčkovi PhD. MBA za čas a rady při vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě „Endress+Hauser“ za zapůjčení měřících přístrojů, bez nichž by nebylo možné práci dokončit. Nakonec bych chtěl poděkovat katedře měření, fakulty elektrotechnické za zapůjčení prostor a proplacení nákladů pro tvorbu pokusu.

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 16. 5. 2016

.....

Michal Hájek

Anotace

Tato práce je zaměřena na měření vícefázového průtoku. Na základě teoretické znalosti principů měření jednotlivých přístrojů, byl sestaven testovací model, který bude po dokončení práce využit jakožto předmět studentských prací. Z tohoto důvodu musel být sestaven dle zadaných kritérií. Následně bylo na testovacím modelu provedeno několik měření pro zjištění funkce průtokoměrů s ohledem na složení vícefázové kapaliny.

Klíčová slova

Vícefázový průtok, průtokoměr, rychlost proudění, srovnání

Annotation

This work is focussed on measuring of multiphase flow. Based on theoretical knowledge of principles used by individual device was created test model, which will be used as subject of student work after the end. For this reason the model had to be built by given criteria. Afterwards several measurements were made to find out functionality with respect to composition of multiphase fluid.

Key Words

Multiphase flow, flowmeter, flow velocity, comparison

Obsah

1. Úvod	1
2. Cíl práce	2
3. Základní pojmy	3
3.1. Hustota	3
3.2. Viskozita.....	3
3.3. Reynoldsovo číslo	4
3.4. Rovnice kontinuity.....	4
3.5. Bernoulliho rovnice	4
3.6. Hydrostatický tlak.....	5
3.7. Proudění	6
3.7.1. Laminární proudění	6
3.7.2. Turbulentní proudění	6
4. Průtokoměry.....	6
4.1. Měření objemu.....	6
4.1.1. Oválný průtokoměr.....	7
4.1.2. Pístový průtokoměr	7
4.2. Měření na rozdíl tlaku	8
4.2.1. Rotametr.....	8
4.2.2. Venturiho dýza	9
4.2.3. Pitotova trubice	9
4.3. Měření rychlosti proudění.....	10
4.3.1. Vírové průtokoměry	10
4.3.2. Ultrazvukové průtokoměry	11
4.3.3. Magneticko-indukční průtokoměry.....	13
4.4. Měření hmotnostního průtoku	15
4.4.1. Tepelné hmotnostní průtokoměry	15
4.4.2. Coriolisův průtokoměr.....	16
5. Vícefázový průtok.....	17
6. Výběr vhodných přístrojů	18
7. Testovací model.....	21
7.1. Specifikace vybraných přístrojů.....	21
7.2. Návrh modelu.....	23
7.3. Návrh přenosu a záznamu dat.....	25
7.4. Realizace a výběr komponentů	26
7.4.1. Čerpadlo	26

7.4.2.	Testovací potrubí.....	27
7.4.3.	Zásobník vody.....	28
7.4.4.	Vzduchové čerpadlo.....	29
8.	Měření.....	29
8.1.	Funkčnost rotometru.....	29
8.2.	Coriolisův průtokoměr.....	30
8.2.1.	Orientační objemový průtok vody $1m^3 \cdot h - 1$	30
8.2.2.	Orientační objemový průtok vody $0,54 m^3 \cdot h - 1$	32
8.3.	Magneticko-indukční průtokoměr.....	33
8.3.1.	Orientační objemový průtok vody $1m^3 \cdot h - 1$	33
8.3.2.	Orientační objemový průtok vody $0,54m^3 \cdot h - 1$	35
8.4.	Vírový průtokoměr.....	36
8.4.1.	Orientační objemový průtok vody $1 m^3 \cdot h - 1$	36
8.4.2.	Orientační objemový průtok vody $0,54 m^3 \cdot h - 1$	38
8.5.	Celkové porovnání přesnosti a návrhy na zlepšení.....	40
9.	Plány pro budoucí práci.....	43
9.1.	Vytvoření počítačové aplikace.....	43
9.2.	Vertikální testování.....	43
9.3.	Testování hypotéz na zlepšení měření.....	43
9.4.	Testování dalších látek.....	43
10.	Závěr.....	44
11.	Zdroje.....	46

Seznam obrázků

Obrázek 1: Koncept viskozity.....	3
Obrázek 2: Zarovnání kapaliny za pomoci hydrostatického tlaku.....	5
Obrázek 3: (a) Laminární proudění, (b) výsledný rychlostní profil.....	6
Obrázek 4: (a) Turbulentní proudění, (b) výsledný rychlostní profil.....	6
Obrázek 5: Měřicí princip oválového průtokoměru.....	7
Obrázek 6: Závislost tlakové ztráty na viskozitě.....	7
Obrázek 7: Měřicí princip rotametru.....	8
Obrázek 8: Vznik vírů na překážce.....	10
Obrázek 9: Kapacitní senzor DSC.....	11
Obrázek 10: Princip ultrazvukového průtokoměru s vyhodnocením doby průchodu.....	12
Obrázek 11: Princip ultrazvukového průtokoměru fungujícího na Dopplerově jevu.....	13
Obrázek 12: Princip funkce magneticko-indukčního průtokoměru.....	14
Obrázek 13: Účinek Coriolisovy síly na typy měřících trubic.....	17
Obrázek 14: Dvofázový průtok (voda-vzduch) v horizontálním a vertikálním potrubí.....	18
Obrázek 15: Postup výběru průtokoměru.....	19
Obrázek 16: Graf měřené chyby v závislosti na rychlosti průtoku.....	22
Obrázek 17: Použité průtokoměry 1) Coriolisův, 2) Magneticko-indukční, 3) Vírový, 4) Ultrazvukový	23
Obrázek 18: Blokové schéma testovacího modelu.....	24
Obrázek 19: 3D testovacího modelu Poznámka: Modrá = testovací průtokoměry, černá = potrubí z PVC, zelená = hadice z PVC, červená = vzduchové čerpadlo, růžová = rotametr, šedá = nádoba s vodou.....	25
Obrázek 20: Realizovaný model.....	26
Obrázek 21: Graf rychlosti průtoku v průběhu měření Coriolisova průtokoměru pro objemový průtok vody $1 \text{ m}^3 \cdot h - 1$	31
Obrázek 22: Průměrná rychlost proudění v průběhu měření pro Coriolisův průtokoměr.....	31
Obrázek 23: Směrodatná odchylka z celého měření.....	31
Obrázek 24: Graf rychlosti průtoku v průběhu měření Coriolisova průtokoměru pro objemový průtok vody $0,54 \text{ m}^3 \cdot h - 1$	32
Obrázek 25: Průměrná rychlost proudění v průběhu měření pro Coriolisův průtokoměr.....	33
Obrázek 26: Směrodatná odchylka z celého měření.....	33
Obrázek 27: Graf rychlosti průtoku v průběhu měření magneticko-indukčního průtokoměru pro objemový průtok vody $1 \text{ m}^3 \cdot h - 1$	34
Obrázek 28: Průměrná rychlost proudění v průběhu měření pro magneticko-indukční průtokoměr.....	35
Obrázek 29: Směrodatná odchylka z celého měření.....	35
Obrázek 30: Graf rychlosti průtoku v průběhu měření magneticko-indukčního průtokoměru pro objemový průtok vody $0,54 \text{ m}^3 \cdot h - 1$	35
Obrázek 31: Průměrná rychlost proudění v průběhu měření pro magneticko-indukční průtokoměr.....	36
Obrázek 32: Směrodatná odchylka z celého měření.....	36
Obrázek 33: Graf rychlosti průtoku v průběhu měření vírového průtokoměru pro objemový průtok vody $1 \text{ m}^3 \cdot h - 1$	37
Obrázek 34: Průměrná rychlost proudění v průběhu měření pro vírový průtokoměr.....	38
Obrázek 35: Směrodatná odchylka z celého měření.....	38
Obrázek 36: Graf rychlosti průtoku v průběhu měření vírového průtokoměru pro objemový průtok vody $0,54 \text{ m}^3 \cdot h - 1$	39
Obrázek 37: Průměrná rychlost proudění v průběhu měření pro vírový průtokoměr.....	39
Obrázek 38: Směrodatná odchylka z celého měření pro vírový průtokoměr.....	39
Obrázek 39: Procentuální změna rychlosti průtoku.....	40

Seznam tabulek

Tabulka 1: Shrnutí průtokoměrů	20
Tabulka 2: Rozsah rychlostí průtoku pro použité přístroje	27
Tabulka 3: Požadavky na rovné délky potrubí pro jednotlivé přístroje	28

1. Úvod

Měření průtoku patří k jednomu z nejstarších úkolů v historii. Už ve starověkém Egyptě bylo využíváno akvaduktů pro místa vzdálená od říčního toku, aby bylo zajištěno jejich zavlažování. V dnešní době se jedná o jednu z nejčastěji měřených veličin v ohledu na průmysl.

Měření průtoků je opravdu rozsáhlé a v dnešním světě naprosto normální. Můžeme měřit od naprosto minimálních toků, jako například krev, až po obrovské řeky a přehradu na nich postavené. Pracovní podmínky pro měření mohou být od velmi prostých, kdy měřenou veličinou je například čistá voda nebo vzduch, až po několika fázové směsi, které jsou například na těžařských stanicích na moři, kdy se směs skládá z ropy, vody, plynu a pevných částic.

Samotný vícefázový průtok je jedním z dnes často zkoumaných a řešených témat. Pod pojmem vícefázového průtoku můžeme chápat jak průtok médií o rozdílném skupenství, tak látek ve stejném skupenství, avšak s jinými fyzikálními vlastnostmi. Virtuálně se každá procesní technologie musí potýkat s fenoménem vícefázového toku, od kavitačních pump a turbín, až po výrobu papíru a plastů. S přechodem do reálných podmínek však skutečnost měření vícefázové směsi není tak jednoduchá.

V této práci se zaměřím na tuto problematiku, s ohledem na průtok látek o rozdílném skupenství, kdy hlavním cílem bude pochopit a vyhodnotit chování těchto směsí v případě různých složení, poměrů a průtoků. Celou práci je možné rozdělit na dvě základní části.

V první části bude čtenář seznámen se stavbou modelu a výběrem komponentů včetně vhodných průtokoměrů na základě dané problematiky.

Druhá část je zaměřena již na samotné měření průtoku. V této části budou rozebrány faktory, které mohou ovlivnit měření jednotlivých přístrojů, jako jsou teplota nebo tlak. S ohledem na tuto skutečnost bude navržen časový interval měření, který bude dostatečně dlouhý pro určení relevantních výsledků. Následně bude provedeno měření o různých složeních směsi a jednotlivé chování přístrojů na tyto směsi bude analyzováno, vyhodnoceno a budou určeny metody na zlepšení měření.

V kapitole plány do budoucna budou poté navrženy postupy pro pokračování, s vylepšením měřicího modelu a testováním dalších kapalin, které nebylo možné již zrealizovat v průběhu práce.

2. Cíl práce

Cílem práce je zkoumání vícefázových směsí různého složení na modelu, který byl vytvořen na testování dané problematiky.

Na základě seznámení s tématem musí být vybrány vhodné průtokoměry, na kterých bude testování probíhat. S ohledem na použité průtokoměry je nutné sestavit testovací model, který bude použit pro následné zkoumání vícefázových směsí. Model by měl být vytvořen tak, aby bylo zajištěno jeho snadné užívání studenty v případě výuky. Z tohoto důvodu musí být daný model dimenzován tak, aby bylo možné jej rozložit na stole uvnitř laboratoře. Dále musí být navržena metoda pro záznam naměřených dat, pro jejich pozdější zkoumání.

Na sestaveném modelu bude provedeno několik měření s různým složením daných vícefázových směsí. Hlavní složkou testování bude voda, do níž bude přidáván vzduch o různém objemu, čímž se zaručí rozdílný druh průtoku dvoufázového média. Naměřená data následně budou za úkol analyzována a bude vyhodnoceno chování jednotlivých přístrojů k různému poměru vody a vzduchu. Na základě analýzy tohoto chování bude následně navržena metoda pro zlepšení měření jednotlivých přístrojů, pro budoucí vylepšení měření.

3. Základní pojmy

Následující text pojednává o základních pojmech pro následnou praktickou část. Převážně se jedná o pojmy, které využívají průtokoměry pro svou měřicí funkci.

3.1. Hustota

Hustota, neboli také měrná hmotnost, je fyzikální veličina, která vyjadřuje jakou hmotnost má jednotkový objem dané látky.

Měrná hmotnost je definována následujícím vztahem:

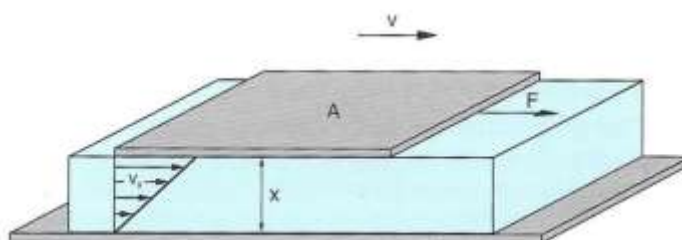
$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Kde m je hmotnost daného tělesa

V odpovídá objemu tohoto tělesa

3.2. Viskozita

Viskozita je vlastnost reálné tekutiny, která způsobuje vznik nenulového smykového napětí mezi dvěma sousedními vrstvami tekutiny, pohybujícími se stejnou rychlostí. Smykové napětí je důsledkem vazebních sil mezi molekulami tekutiny, a proto nucený pohyb tekutiny vyvolává přídavné vnitřní síly nebo vnitřní tření.



Obrázek 1: Koncept viskozity

Z předchozího obrázku jsme schopni určit smykové napětí, které bude dáno následujícím vztahem

$$\frac{F}{A} = \tau = \eta \frac{dv}{dx} \quad (2)$$

Kde A je plocha mezi pevnou stěnou a deskou tekutiny

F je síla, jež pohybuje touto deskou

η je konstanta úměrnosti, nazývaná také dynamická/absolutní viskozita

$\frac{dv}{dx}$ je gradient rychlosti podél tloušťky proudící tekutiny, který vzniká, jelikož rychlost tekutiny v těsné blízkosti stěny je nulová, zatímco těsně pod pohyblivou deskou dosahuje hodnoty v

Druhým velice důležitým pojmem spjatým s viskozitou je kinematická viskozita ν , která je definována podílem

$$v = \frac{\eta}{\rho} \quad (3)$$

Kde ρ je hustota dané tekutiny

Viskozita je jedním ze základních kritérií při měření průtoku, má zásadní význam, jelikož s místní rychlostí, polohou v potrubí a drsností stěn určuje rychlostní profil v daném potrubí.

3.3. Reynoldsovo číslo

Reynoldsovo číslo Re je důležitým kritériem pro posuzování druhu proudění. Dané číslo určuje poměr mezi setrvačnými a třecími silami v tekutině. Budeme-li uvažovat kruhové potrubí o průměru délky L , bude Reynoldsovo číslo Re_L definováno následujícím vztahem

$$Re_{DN} = \frac{\text{setrvačné síly}}{\text{třecí síly}} = \frac{\rho v^2 L}{\eta v} = \frac{\rho v L}{\eta} = \frac{v L}{\nu} \quad (4)$$

Kde η je dynamická viskozita tekutiny

ν je kinematická viskozita tekutiny

3.4. Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity platí pro všechny nestlačitelné tekutiny. Platí, neboť musí být zachována hmotnost tekutiny proudící v uzavřeném potrubí mezi dvěma místy pozorování o různých plochách průřezu S_1 a S_2 s rychlostmi v_1 a v_2 za stejná časový interval. Bez této rovnice by docházelo k hromadění nebo rozpouštění tekutiny v daném potrubí.

Vyjádríme-li předchozí vztah matematicky, dostaneme

$$\rho S_1 v_1 = \rho S_2 v_2 \quad (5)$$

Kde ρ je hustota tekutiny

Rovnici č. 5 můžeme také zobecnit a tím získáme následující rovnici

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 = \dots = S_i v_i = \text{konst.} \quad (6)$$

kteřá je označována jako rovnice kontinuity

3.5. Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice popisuje energetické poměry při proudění tekutin. Tato rovnice je jednou z aplikací zákona o zachování energie na proudícím médiu. Jedním ze základních předpokladů je platnost nestlačitelnosti tekutiny, tedy platnost rovnice kontinuity a rovnoměrné rozdělení rychlosti po celém potrubí.

Zjednodušeným tvarem rovnice můžeme uvažovat následující rovnici

$$K_1 + P_1 + Z_1 = K_2 + P_2 + Z_2 = \dots = K_i + P_i + Z_i = \text{konst.} \quad (7)$$

Kde K je kinetická energie

P je tlaková energie

Z je potenciální energie

Za předpokladu rovnice č. 7 platí následující rovnice v tlakovém tvaru

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = konst. \quad (8)$$

Kde p je tlak v kapalině

ρ je hustota kapaliny

v je rychlost proudění

g je tíhové zrychlení

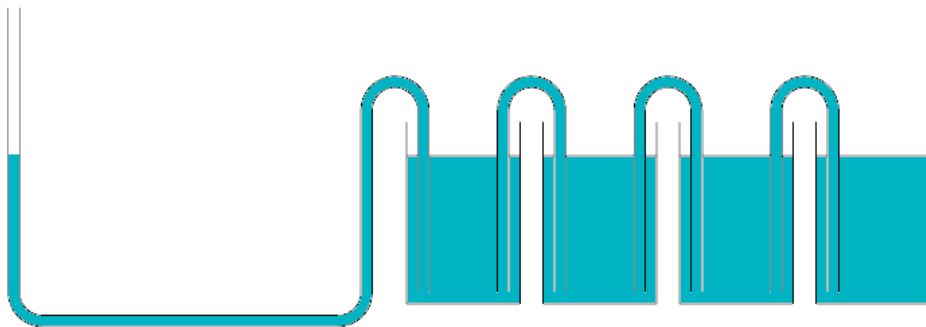
h je nadmořská výška

Důsledkem platnosti Bernoulliho rovnice vyplývá, že v případě zvyšující se rychlosti proudící kapaliny, klesá její tlak. Proto také platí, že pokud na kapalinu v klidu působí tíhová síla, je ve stejné hloubce v každém bodě stejný tlak, avšak v případě, že je kapalina v pohybu, tak tento vztah neplatí.

3.6. Hydrostatický tlak

Hydrostatický tlak působí v kapalině, která je v dané soustavě v klidu a působí na ni nenulový součet gravitační a setrvačné síly.

Hydrostatickým tlakem tlačí kapalina na tělesa do ní ponořená, na stěny nádoby nebo na své vlastní části (výše položené části tlačí svou tíhou na níže položené části kapaliny).



Obrázek 2: Zarovnání kapaliny za pomoci hydrostatického tlaku

Hydrostatický tlak je definován vztahem:

$$p_h = hg\rho \quad (9)$$

Kde h je hloubka

g je gravitační konstanta

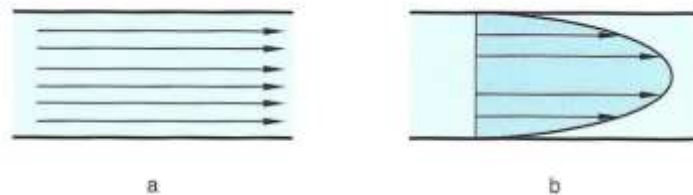
ρ je hustota kapaliny

3.7. Proudění

Funkce jednotlivých průtokoměrů je zásadně ovlivněna prouděním dané látky v potrubí. Jeho povaha je závislá na rozložení třecích a setrvačných sil v tekutině. Důležitým kritériem pro posouzení druhu daného proudění je Reynoldsovo číslo zmíněné v odstavci 3.3. Kritická hodnota, určující hranici mezi laminárním a turbulentním prouděním, je v tomto případě (kdy uvažujeme kruhové potrubí) $Re_{krit} = 2320$. V případě, že je hodnota čísla větší než hodnota kritická, jedná se o turbulentní proudění, v opačném případě naopak o proudění laminární. (Kadlec, 2015)

3.7.1. Laminární proudění

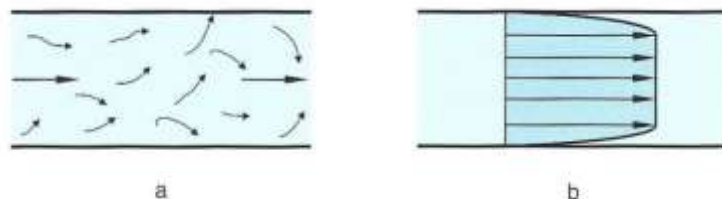
Při laminárním proudění převládá účinek třecích sil mezi navzájem se nemíchajícími se vrstvami dané tekutiny, jenž proudí v potrubí. Částice se pohybují po drahách, které se navzájem nekříží. Rychlost tekutiny je poté rozdělena parabolicky s nejvyšší rychlostí v ose potrubí a nejmenší rychlostí v místě styku hraničních vrstev se stěnami potrubí, kde je podle očekávání největší působení třecích sil. Díky tomu vzniká takzvaný úplně vyvinutý rychlostní profil ve tvaru rotačního osově symetrického paraboloidu. Laminární proudění je typické pro viskózní tekutiny a malé rychlosti proudění.



Obrázek 3: (a) Laminární proudění, (b) výsledný rychlostní profil

3.7.2. Turbulentní proudění

Při proudění turbulentním dochází ke křížení drah částic tekutiny, vytváří se víry a díky tomu chaotický pohyb tekutiny, který neprospívá k průtoku. Ke zvýšení průtoku je nutné podstatně zvýšit tlak v potrubí. Uplatňují se především účinky setrvačných sil, tekutina proudí ve většině průřezu téměř stejnou rychlostí a rychlostní profil je plochý. Ke vzniku turbulentního proudění dochází také při míchání dvou nezávislých toků. Například v případě této práce, docházelo ke vzniku turbulentního proudění v místě příměsi vzduchu do kapaliny.



Obrázek 4: (a) Turbulentní proudění, (b) výsledný rychlostní profil

4. Průtokoměry

4.1. Měření objemu

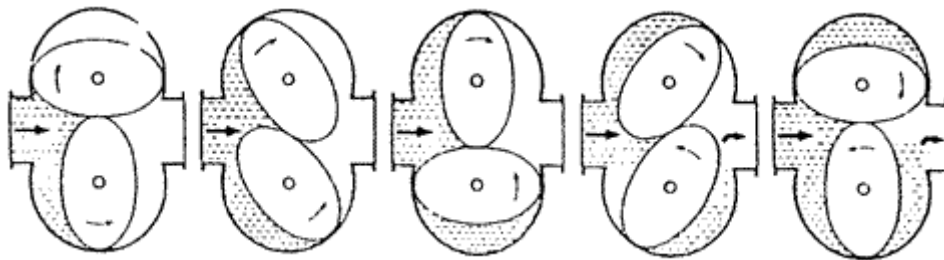
Objemové průtokoměry jsou založeny na přímém měření objemu nebo hmotnosti tekutiny. Dané měření může být jak spojitě tak diskrétní.

V případě spojitého měření dochází k cyklickému plnění a vyprazdňování odměrných prostor tak, aby bylo měření plynulé. Výsledným měřítkem pro určení objemového průtoku je poté počet cyklů za určitou jednotku času. (Kadlec, 2015)

V případě využití diskrétních metod je tekutina dělena na konečné objemové dávky a odtud také pochází jejich označení dávkovací průtokoměry. Proudící tekutina na úkor trvalé ztráty tlaku a kinetické energie vtéká do předem vymezených objemových prostor. Tyto prostory jsou konstantně naplňovány a vyprazdňovány, tím je tekutina rozdělena na dávky. Přesný počet těchto dávek poté určuje proteklé množství. V praxi se přístroje, využívající diskrétní metody, využívají spíše v laboratorních podmínkách, jakožto kalibrační měřidla. (Ďaďo, 2005)

4.1.1. Oválový průtokoměr

Typickou ukázkou objemového průtokoměru je tzv. „oválový průtokoměr“. Je založen na principu dvou pohybujících se oválových těles. Ta mohou být buď sama ozubená a zapadající do sebe, nebo je jejich pohyb prováděn prostřednictvím ozubených kol. Pohon průtokoměru je zajištěn za pomoci momentů, jenž jsou vyvolány změnou tlaků p_1 a p_2 . Díky této skutečnosti vznikají mezi stěnami a tělesy střídavě plnicí a vyprazdňující se komory. Počet otáček je poté zaznamenáván v čítači, jako jednotka úměrná objemovému průtoku (Kadlec, 2015).



Obrázek 5: Měřící princip oválového průtokoměru

Negativní stránkou tohoto způsobu měření je trvalá tlaková ztráta, která je však zpravidla menší než 100 kPa, obvykle je daná tlaková ztráta závislá na viskozitě dané látky. Se zvyšující se viskozitou se zvyšuje také tlaková ztráta.



Obrázek 6: Závislost tlakové ztráty na viskozitě

4.1.2. Pístový průtokoměr

Pístové průtokoměry patří mezi jedny z nejpřesnějších přístrojů pro měření proteklého množství v případě kapalin. Měřenou kapalinou jsou střídavě naplňovány a vyprazdňovány odměrné prostory, které jsou vymezené pístem a tělesem daného měřidla. Píst, jenž je spojený s počítadlem, se

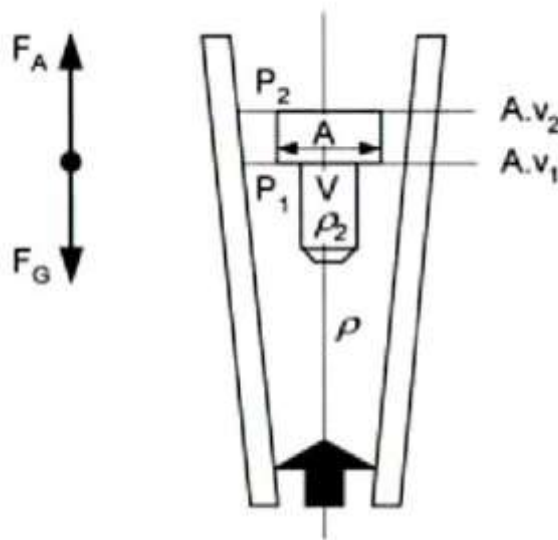
pohybuje vlivem tlakového spádu na měřidle. V praxi se běžně využívají dva a více odměrných prostorů, jejichž funkce je distribuována tak, aby byl zajištěn plynulý chod i nepřerušovaný průtok média. (Kadlec, 2015)

4.2. Měření na rozdílů tlaku

Přístroje, které pro určení rychlosti proudění využívají princip zachování energie vyjádřený za pomoci Bernoulliho rovnice. Při proudění tekutiny dochází k vzniku kinetické energie v důsledku vzrůstu dynamického tlaku na úkor tlaku statického, přičemž tlak celkový zůstává zachován.

4.2.1. Rotametr

Rotametry, neboli průtokoměry s proměnným průřezem, řadíme do skupiny průtokoměrů na principu tlakového rozdílu. Proudící médium o určité rychlosti naráží do překážky v podobě plováčku a tím dochází ke změně jeho polohy.



Obrázek 7: Měřící princip rotametru

Plováček o ploše A , s hustotou ρ a objemem V je nadnášen médiem o určené hustotě ρ , které proudí v trubici, jenž má kónický tvar. Plováček se ustálí v poloze tak, aby působící síly byly v rovnováze. Jedná se o sílu (F_A), působící ve směru proudění, a (F_G) neboli gravitační sílu působící proti proudu. Kónický tvar zajišťuje rozdíl mezi horním a spodním průřezem. Díky Bernoulliho rovnici dochází k rozdílu rychlostí v_1 , v_2 a statických tlaků p_1 , p_2 tedy spodní a horní části plováčku, objemový průtok je poté roven.

$$Q_v = C_d A_d \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot V_t}{s \cdot \rho} \left(\frac{\rho_t}{\rho} - 1 \right)} \quad (10)$$

Kde C_d je koeficient ztráty (závislé na viskozitě)

A_d je plocha prstence mezi plovákem a trubicí

V_t je objem tělíska

ρ je hustota média

ρ_t je hustota tělíska

Pro všechny hodnoty průtoku Q_V se plováček ustálí v určité poloze tak, aby plocha A_2 daného prstence mezi stěnou a plováčkem odpovídala vrchní rovnici. Výška plováku se poté odečítá na stupnici, která se nachází na stěně dané trubice, v níž je uložen. Při kónickém tvaru trubice bývá stupnice kvadratická. Z průtokové rovnice rotametru je také zřejmé, že údaj přístroje je závislý na hustotě měřené látky. Z tohoto důvodu měří-li se průtok jiné látky než na kterou byl přístroj kalibrován je potřeba provést pro získání správného průtoku přepočet. (Kadlec, 2015)

4.2.2. Venturiho dýza

Venturiho dýza je jedním z průtokoměrů založených na škrtících orgánech. Průtokoměry na tomto principu fungují za pomoci překážky vložené dovnitř trubice. V tomto případě se jedná o překážku, která se skládá ze dvou částí. První částí je nátrubek, jenž je zaoblen na vtokové straně a poté z výtokové strany, která má tvar kužele a pomalu se rozšiřuje až na původní průměr potrubí. Jelikož je poměr obou průtočných průřezů stejný, můžeme hovořit o měřidlech s konstantním zúžením. (Kadlec, 2015)

Výpočtové vzorce pro určení daného průtoku jsou určeny díky zákonu o zachování hmoty vyjádřeného za pomoci rovnice kontinuity a dále za pomoci zákonu o zachování energie vyjádřeného Bernoulliho rovnicí. Díky těmto dvou rovnicím můžeme určit průtok Q_V a to následujícím stavem:

$$Q_V = S_2 \cdot v_2 = \frac{S_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (11)$$

4.2.3. Pitotova trubice

Pitotova trubice patří mezi jeden z nejstarších principů měření průtoku. Princip spočívá ve vložení úzké trubičky s ústím kolmo ke směru proudící tekutiny. U ústí dochází k poklesu rychlosti proudění přibližně k nule a kinetická energie se mění na energii potenciální. Sonda poté snímá celkový tlak p_c , který je určen součtem statického (p_s) a dynamického (p_d) tlaku. Jelikož statický tlak p_c je snímán na okrajích potrubí, tedy v odlišném místě než je snímán tlak sondy p_c , dochází k nedostatkům této metody. Rovnice výpočtu statického tlaku je dána poté:

$$p_c = p_s + p_d = p_s + \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (12)$$

V případě, že známe také hustotu tekutiny ρ můžeme její rychlost vyjádřit jako:

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{p_c - p_s}{\rho}} \quad (13)$$

Celkové nastavení otvoru pro měření tlaku p_c musí být vloženo do prostoru, kde tekutina protéká průměrnou rychlostí. Dosáhnout tohoto stavu je celkem obtížné, a proto je doporučeno využívat daný měřicí princip spíše pro turbulentní proudění. (Kadlec, 2015)

4.3. Měření rychlosti proudění

Přístroje, pracující na základě rychlosti proudění, určují hodnotu průtoku z místní, nebo průměrné rychlosti proudění.

4.3.1. Vírové průtokoměry

Vírové průtokoměry fungují na využití tzv. von Kármánově efektu. Tento efekt vzniká v případě, že je do proudu daného média vložena překážka neaerodynamického tvaru, kterou musí toto médium obtékat. V dané situaci vznikají na obou stranách víry, které se poté od překážky oddělují a vytváří tzv. von Kármánovy víry (stezku). Vznik vírů na vnořeném tělese také doprovází okamžitá změna rychlosti a tlaku. To vše je snímáno senzorem a poté převedeno na elektrický signál. Následná frekvence vzniku těchto vírů, je v určitém rozsahu Reynoldsova čísla úměrná rychlosti proudící tekutiny a díky tomu také i velikosti daného průtoku. Vše můžeme vyjádřit také matematicky následujícím vztahem:

$$\frac{Q_V}{f \cdot D^3} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{S_r} \cdot \frac{b}{D} \quad (14)$$

Kde Q_V je objemový průtok

f je základní frekvence vloženého tělesa

D je průměr potrubí

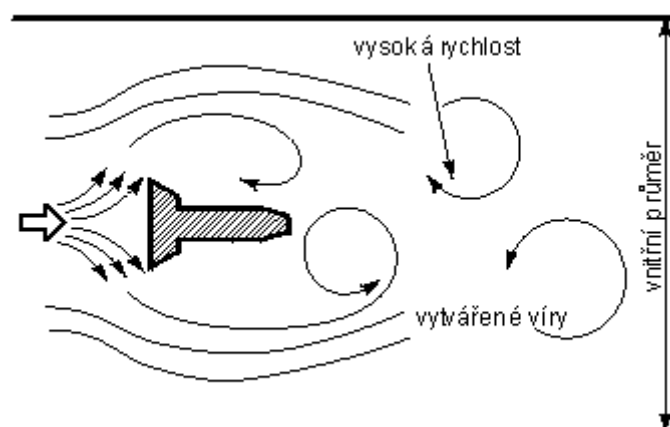
b je šířka čelní plochy vnořeného tělesa

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

Frekvenci vzniku kmitajících vírů poté můžeme vyjádřit následovně:

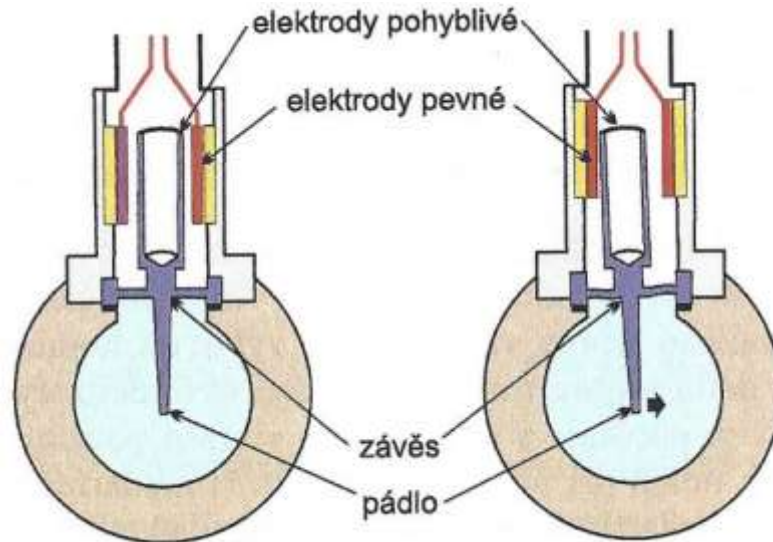
$$f = S_r \frac{v}{b} \quad (15)$$

Kde v je rychlost proudu média



Obrázek 8: Vznik vírů na překážce

V této práci byl využíván přístroj využívající tzv. DSC (Differential switched Capacitor) neboli kapacitní senzory. Ty jsou tvořeny diferenčním zapojením kapacit C_1 a C_2 mezi pevnými (vnějšími) a pohyblivými (středovými) elektrodami. Kármánovy víry vytvářející stezku působí na terčíku, uloženém v závěsu. Důsledkem vychýlení z klidové polohy ($C_1 = C_2$), způsobeného chvěním, se změní velikost kapacit ($C_1 \neq C_2$). Vše je následně vyhodnoceno následnou elektronickou fází. (Ďaďo, 2005)



Obrázek 9: Kapacitní senzor DSC

K měření bývají také využívány piezoelektrické senzory, využívající ke svému měření přepážku, která se následkem vzniku vírů chvěje a toto chvění je přenášeno na senzor. Tento senzor přenáší chvění na elektrický signál, jehož frekvence je rovna frekvenci vzniku vírů. (Kadlec, 2015)

Další možností jsou ultrazvukové senzory. Tato možnost je tvořena ultrazvukovým vysílačem a přijímačem, které jsou připevněny na potrubí za překážkou. Z důvodu tvorby vírů dochází k modulaci ultrazvukového signálu o frekvenci, která odpovídá frekvenci vzniklých vírů. (Kadlec, 2015)

4.3.2. Ultrazvukové průtokoměry

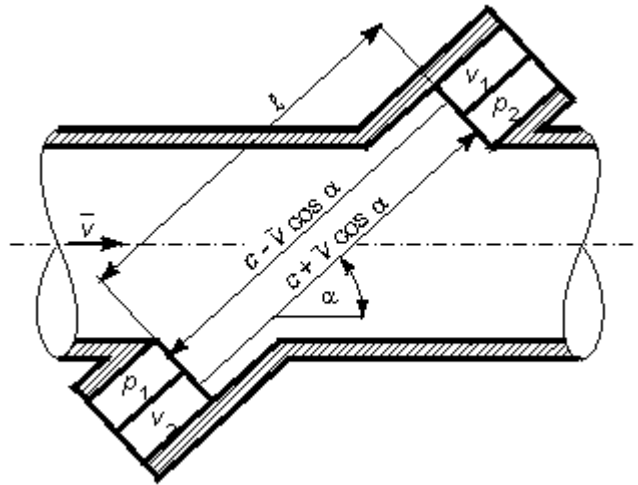
Jedná se o přístroje, které využívají ke své funkci ultrazvukové vlnění. Tyto přístroje můžeme dělit do dvou skupin podle principu, jakým toto vlnění využívají.

4.3.2.1. S vyhodnocením doby průchodu

Tyto ultrazvukové senzory pracují na jednoduchém principu, že ultrazvukové vlny vyslané do potrubí jsou přímo ovlivněny proudem protékající tekutiny. Vysvětleno v jednoduchých termínech, budeme-li plavat proti proudu, musíme vynaložit větší energii, než v případě plavání ve směru proudu. Funkce měření s vyhodnocením doby průchodu je založena na tomto prostém fyzikálním faktu. (E+H, 2006)

Na potrubí jsou přidělané dva piezoelektrické měniče (senzory s možností pracovat jakožto vysílač i přijímač ultrazvuku), které konstantně vysílají do potrubí ultrazvukové vlny. V případě nulového průtoku potrubím obdrží oba senzory signál ve stejný čas, tzn. bez časového zpoždění. Ovšem pokud potrubím bude protékat kapalina, signál bude potřebovat rozdílný čas pro zdolání vzdálenosti (v závislosti na proudu), aby dosáhl jednotlivých senzorů. V případě, že známe vzdálenost mezi senzory, můžeme vypočítat rozdílnou dobu průchodu, která je přímo úměrná

rychlosti proudění. Oba senzory jsou poté připojeny na vysílač, který generuje ultrazvukové vlny a měří jejich dobu průchodu z jednoho senzoru na druhý. (E+H,2006)



Obrázek 10: Princip ultrazvukového průtokoměru s vyhodnocením doby průchodu

V případě matematického vyjádření uvažujeme, že vysílač V_1 vysílá impulzy ve směru proudu, zatímco vysílač V_2 proti směru. Víme, že ultrazvuk ve směru proudu se bude šířit rychlostí $c + \bar{v} \cos \alpha$, kde c je rychlost šíření ultrazvuku v daném prostředí, \bar{v} je střední rychlost proudícího média a $\cos \alpha$ je úhel mezi senzorem a směrem proudění. Pokud budeme brát vysílač V_2 budeme mít rovnici ve tvaru $c - \bar{v} \cos \alpha$. Doba mezi vysláním a přijemem pulzu mezi jednotlivou dvojicí poté bude:

$$\tau_1 = \frac{L}{c + \bar{v} \cdot \cos \alpha} ; \tau_2 = \frac{L}{c - \bar{v} \cdot \cos \alpha} \quad (16)$$

Kde L je vzdálenost mezi senzory

Jejich rozdíl poté můžeme spočítat následovně:

$$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1 = \frac{2 \cdot L \cdot \bar{v} \cdot \cos \alpha}{c^2 \cdot \bar{v}^2 \cdot \cos^2 \alpha} \quad (17)$$

Budeme-li předpokládat že platí $\bar{v}^2 \ll c^2$ můžeme upravit vztah na:

$$\bar{v} = \frac{c^2}{2 \cdot L \cdot \cos \alpha} \cdot \Delta\tau \quad (18)$$

Pro rychlost šíření ultrazvuku poté píšeme:

$$c = \frac{2 \cdot L}{\tau_2 - \tau_1} \cdot \Delta\tau \quad (19)$$

Po dosazení veškerých vztahů do rovnice 19. získáme výslednou rovnici pro objemový průtok ve vztahu:

$$Q_V = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot L}{2 \cos \alpha} \cdot \frac{\Delta\tau}{(\tau_1 + \tau_2)^2} \quad (20)$$

Kde D je průměr potrubí

4.3.2.2. Dopplerovy

Průtokoměry založené na Dopplerově jevu vysílají do média ultrazvukové vlny s konstantní frekvencí a přijímají vlnění, které se odrazí od nehomogenit rozptýlených v proudu tekutiny. Jakožto nehomogenity můžeme považovat například pevné částice nebo bubliny rozptýlené uvnitř. Jelikož se tyto částice a bubliny uvnitř pohybují za pomoci proudícího média, je tato frekvence na přijímači odlišná od frekvence, jaká by byla za klidného stavu bez pohybu. Rozdíl těchto frekvencí je poté přímo úměrný rychlosti proudění. Přísne vzato měří tedy průtokoměry na Dopplerově principu rychlost pohybu těchto nehomogenit a nikoliv tekutiny. Budeme-li uvažovat, že vysílač vysílá ultrazvuk o konstantní frekvenci f , rychlost ultrazvuku c , a že rychlost dané nehomogenity je v , dostaneme následující rovnici:

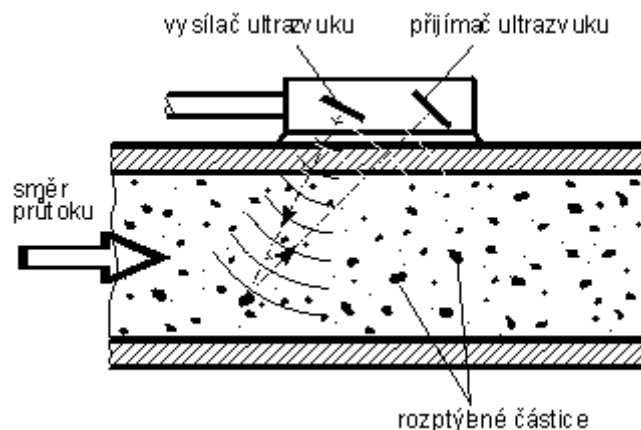
$$f_1 = \frac{c + v \cdot \cos \alpha}{c} \cdot f \quad (21)$$

Frekvence přijatá přijímačem poté bude:

$$f_2 = \frac{c}{c - v \cdot \cos \alpha} \cdot f_1 \quad (22)$$

V případě, že c je podstatně větší než v můžeme vyloučit f_1 a poté získáváme:

$$\Delta f = f_2 - f = \frac{2 \cdot f \cdot v \cdot \cos \alpha}{c} \quad (23)$$

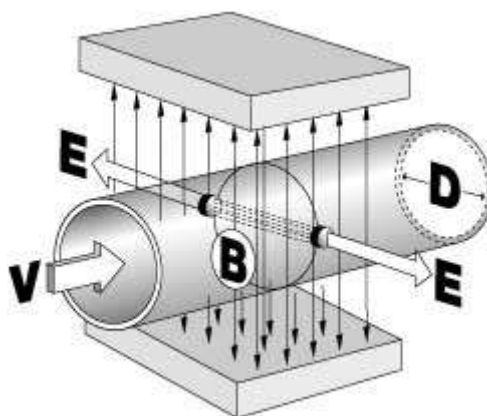


Obrázek 11: Princip ultrazvukového průtokoměru fungujícího na Dopplerově jevu

4.3.3. Magneticko-indukční průtokoměry

Magneticko-indukční průtokoměry patří mezi velmi přesné a perspektivní průtokoměry dnešní doby. Jejich princip nabízí možnost měření širokého spektra kapalin. Tato kapalina ovšem musí splňovat základní podmínku minimální vodivosti, a proto nejsou vhodné na měření plynů. Principu měření nevadí ani vysoká viskozita této kapaliny, avšak nesmí být příliš vysoká, neboť by mohlo dojít k ucpání měřicí sondy tím znemožnění měření.

Přesnější označení indukčního průtokoměru je elektromagnetický průtokoměr. Například v zahraniční literatuře se častěji setkáme s označením „Electromagnetic flowmeters“, avšak norma ČSN EN 24006 doporučuje k jejich pojmenování využití názvu indukční průtokoměr z důvodu toho, že měřící princip je nejčastěji vysvětlován za pomoci Faradayova zákona o elektromagnetické indukci. Proto i v dalším textu bude využito toto označení. (Ďaďo, 2005)



Obrázek 12: Princip funkce magneticko-indukčního průtokoměru

Funkci měření indukčního průtokoměru můžeme popsat základním principem. Tento princip je popsán právě Faradayovým zákonem o elektromagnetické indukci. Pohybem vodiče o délce l , který se pohybuje rychlosti v za působení kolmého pole o indukci B , je vytvářeno indukované napětí. Toto napětí můžeme vyjádřit vztahem:

$$U = B \cdot D \cdot v \quad (24)$$

Budeme-li uvažovat o potrubí s kruhovým průřezem, kterým protéká daná kapalina, dostaneme:

$$U = B \cdot D \cdot v = B \cdot D \cdot \frac{4 \cdot Q_V}{\pi \cdot D^2} \quad (25)$$

Kde U je indukované napětí

B je indukce magnetického pole

v je rychlost proudění

D je průměr potrubí

Q_V je objemový průtok

Druhým možným vysvětlením principu měření je využití Lorenzova zákona. Toto využití je bližší fyzikální podstatě děje. Magnetické síly působící na náboj q , jenž se pohybuje v magnetickém poli o indukci B , rychlostí v a elektrické síly působící na tento náboj v elektrickém poli o intenzitě E . V proudící kapalině, která musí být vodivá, jsou v dostatečném množství koncentrovány ionty, pohybující se ve směru daného proudění. Síla F_M , vyvolaná magnetickým polem, způsobuje vychýlení iontu s nábojem q (v případě rychlosti v a indukci B) je poté dána vektorovým součinem:

$$F_M = q(v \times B) \quad (26)$$

Tato síla způsobuje vychýlení určeného náboje směrem k elektrodám umístěným na stěnách potrubí o určitém průměru d . Ono vychýlení poté způsobí rozdíl potenciálů o napětí U . Hodnota intenzity elektrického pole je poté dána následujícím vztahem:

$$|E| = \frac{U}{d} \quad (27)$$

Elektrická síla F_e poté působí dle Lorenzova zákona v opačném směru než síla magnetická

$$F_e = q \cdot E \quad (28)$$

Síly F_m a F_e poté působí proti sobě a proto platí pro rovnováhu:

$$|q(v \times B)| = q \cdot \frac{U}{d} \quad (29)$$

4.4. Měření hmotnostního průtoku

I když všechny přístroje v předchozí části měří průtok objemovou metodou, existují také přístroje, které měří tzv. hmotnostní průtok. Hlavním rozdílem tedy je, že neměří objem proteklý za určitý čas potrubím, ale hmotnost proteklé látky za čas.

4.4.1. Tepelné hmotnostní průtokoměry

U tepelných průtokoměrů se využívá k měření průtoku média vliv proudění tekutiny na šíření tepla. Celý princip spočívá ve vyhodnocování energetické rovnováhy při sdílení tepla z topného čidla do proudící tekutiny, díky čemuž dochází ke změnám teploty. Změny teploty jsou úměrné množství protékající tekutiny. Rozdělení teplotních průtokoměrů je dáno uspořádáním měřicí soustavy.

4.4.1.1. Termoanemometry

U termoanemometrů je princip měření dán vyhodnocením chladícího účinku protékající tekutiny na teplotním čidle.

Do protékající tekutiny jsou vložena dvě čidla (R_m, R_t) rozdílného odporu. V praxi bývá rozdíl těchto čidel v poměru 1:100 ve směru protékající tekutiny. Tato čidla jsou mezi sebou zapojena do můstku kde čidlem s menším odporem R_m prochází daleko větší proud a vyhřívá čidlo na mnohem vyšší teplotu, zatímco čidlo s odporem R_t odpovídá teplotě tekutiny. V případě, že se potrubím nepohybuje, dochází k chlazení za pomoci přirozené konvekce (proudění), avšak dochází-li k proudění, je teplo odváděno převážně konvekci nucenou, což se projeví ochlazením čidla R_m . Jelikož čidlo R_t stále udržuje teplotu svého okolí, je výsledný hmotnostní průtok Q_V dán hodnotou procházejícího proudu I_m . Závislost odvedeného proudu vůči průtoku můžeme vyjádřit vztahem:

$$I_m = a + b \cdot \sqrt{Q_m} \quad (30)$$

Kde a je konstanta respektující přestupy tepla do okolí, při nulovém průtoku

b je konstanta závislá na geometrii senzoru, teplotě, hustotě, viskozitě, tepelné vodivosti a tepelné kapacitě měřeného média (Kadlec, 2015)

4.4.1.2. Kalorimetry

Kalorimetrické průtokoměry naopak vyhodnocují míru oteplení způsobenou prouděním tekutiny. V praxi se velmi často využívá senzor s tzv. bypassem. Jedná se o tenkou obtokovou kapiláru o určitém průměru, kde prochází určitá část průtoku. Uprostřed kapiláry je vloženo otopní tělísko, které konstantě dodává teplo do proudící kapaliny. Po obou stranách otopného tělíska jsou ve stejné vzdálenosti umístěny teplotní senzory. V případě, že nedochází k pohybu kapaliny, je teplota na obou senzorech totožná, avšak v případě průtoku dojde k nucené konvenci a symetrický stav bude narušen. A jeden ze senzorů bude mít vyšší teplotu (v závislosti na směru proudění). Díky rozdílným teplotám na senzorech dochází k rozdílu hodnoty na rezistorech, kterými je každý senzor vybaven,

což se projeví vychýlením na diagonále Wheatstonově můstku. Výsledný hmotnostní průtok Q_m je poté dán lineárně na rozdílu teplot ($T_2 - T_1$), které udávají výstupní signál. Vztah pro určení průtoku je pak dán následovně:

$$(T_2 - T_1) = A \cdot c_p \cdot P \cdot Q_m \quad (31)$$

Kde T_1 a T_2 jsou teploty na senzorech

A je konstanta ($s^2 \cdot \frac{K^2}{J^2}$)

c_p je tepelná kapacita ($\frac{J}{kg \cdot K}$)

P je tepelný příkon ($\frac{J}{s}$)

4.4.2. Coriolisův průtokoměr

Coriolisovy průtokoměry dosáhly rychlého rozšíření ve všech odvětvích provozního měření. Tyto přístroje dovolují měřit všechny rychlosti průtoků, od velice nízkých, využívaných v laboratorních podmínkách, až po $180m^3 \cdot h^{-1}$. Měřený průtok je velice přesný a výsledný údaj je v podstatě nezávislý na dalších jevech, jako jsou teplota, tlak, viskozita a obsah pevných látek v tekutině.

Princip měření využívá tzv. Coriolisovy síly. Tato síla vzniká na tělese pohybujícím se rychlostí w v soustavě, která se otáčí úhlovou rychlostí ω , výsledné zrychlení a_c nazýváme „Coriolisovo zrychlení“

$$\vec{a}_c = 2 \cdot (\vec{\omega} \times \vec{w}) \quad (32)$$

Výslednou Coriolisovu sílu poté máme danou vzorcem:

$$\Delta F_C = 2 \cdot \Delta m \cdot (\vec{\omega} \times \vec{w}) \quad (33)$$

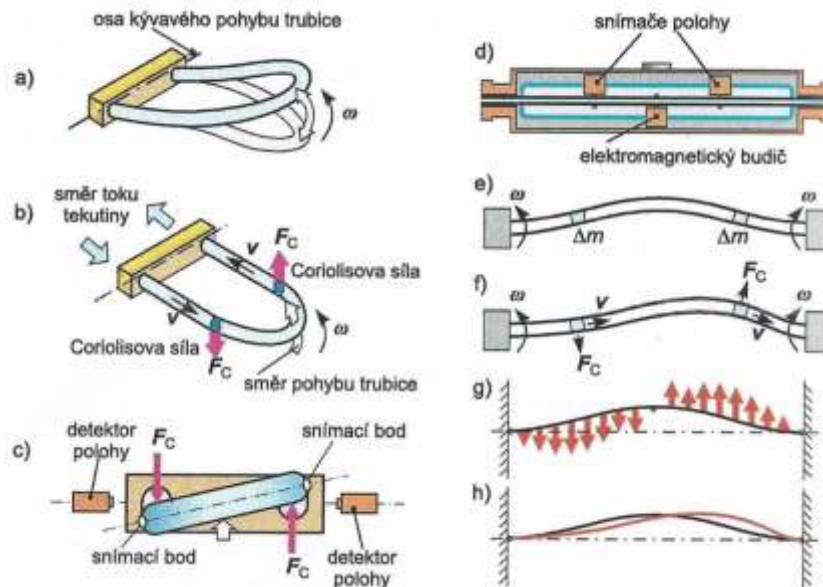
Kde Δm element tekutiny o dané hmotnosti

Jelikož víme, že vektory $\vec{\omega}$ a \vec{w} jsou na sebe kolmé, dostaneme po dosazení $v = \frac{\Delta l}{\Delta t}$ rovnici:

$$|\Delta F_C| = 2 \cdot \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot \omega \cdot \Delta l = 2 \cdot Q_m \cdot \omega \cdot \Delta l \quad (34)$$

V případě využití v průtokoměrech je úhlová rychlost nahrazena harmonickým kmitáním. Ve vibrujících měřicích trubcích při průtoku hmotného média vzniká Coriolisova síla. Tato setrvačná síla, která působí na těleso pohybující se v rotující (kmitající) soustavě tak, že její vzdálenost od osy otáčení je proměnná a tedy způsobuje stáčení trajektorie tělesa, jenž se pohybuje. Největší účinek nastává v případech, když je směr pohybu tělesa kolmý ke směru otáčení dané soustavy. (Bednařík, 2011)

Při průtoku kapaliny trubcí dojde vlivem Coriolisovy síly k její deformaci. Podle velikosti průtoku dojde ke změně úhlu zkroucení (deformaci) trubice. Velikost zkroucení je snímáno příslušným senzorem polohy.



Obrázek 13: Účinek Coriolisovy síly na typy měřících trubíc

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 trubicí, 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

Tato deformace je velice malá a je vyhodnocována jako fázový posun snímaných kmitů. Fázový posun vytvořený rezonančním kmitáním trubice, který vznikl v důsledku působení Coriolisovy síly, je úměrný hmotnostnímu průtoku kapaliny. Případné snímání frekvence kmitů, jenž trubice vykoná, by odpovídal výsledné hustotě dané kapaliny. (E+H,2006)

5. Vícefázový průtok

Vícefázový průtok, v případě bakalářské práce týkající se mechaniky tekutin, je ustálený průtok látek s odlišným skupenstvím (např. kapaliny, plyn, pevné látky) nebo látek s odlišnými chemickými vlastnostmi, avšak stejným skupenstvím (např. voda s olejem).

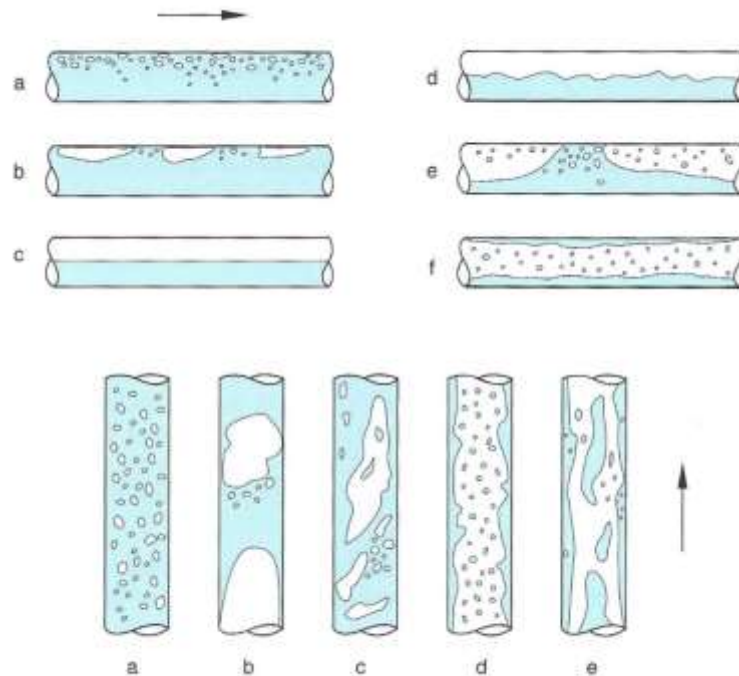
Každá látka má odlišné vlastnosti průtoku, jako jsou objemový podíl (součet, který určuje jednotu) a rychlostní pole. Z tohoto důvodu dochází při měření vícefázových médií k nepřesnostem měření, které jsou závislé na poměru látek a konfiguraci daného přístroje.

Ve většině měření se počítá s tzv. dvoufázovým průtokem. Tento průtok obvykle bývá spojením plynné a kapalné fáze v uzavřeném potrubí. Problém u dvou a vícefázového průtoku přichází v případě nízkých průtoků. Jelikož za nízké rychlosti nedochází k dostatečnému promíchání látek, vzniká diskretní tok dvou.

V případě dostatečného průtoku dochází k míchání látek a jejich směs je poté odborně nazývána jako „mísitelná“ (anglický originál využívá pojem „miscible“). Výslednou směs obvykle nebývá problém měřit. V případě, že výsledné látky jsou „nemísitelné“ (anglický originál „immiscible“), může docházet k chybám v měření. (E+H, 2006)

Kavitace, neboli vznik dutin v kapalině, vzniká při lokálním poklesu tlaku, který následuje jejich implozí. Tento pokles tlaku může být způsoben lokálním zvýšením rychlosti (tzv. hydrodynamická kavitace) nebo průchodem intenzivní akustické vlny (tzv. akustická kavitace). V počátku jsou tyto

dutiny vyplněny vakuem, ovšem později se vyplňují párou nebo plyny z okolní kapaliny. V momentě ztráty podtlaku vzniklého kavitací dochází ke kolapsu bubliny za vniku rázové vlny, která má destruktivní účinek na okolní materiál.



Obrázek 14: Dvofázový průtok (voda-vzduch) v horizontálním a vertikálním potrubí

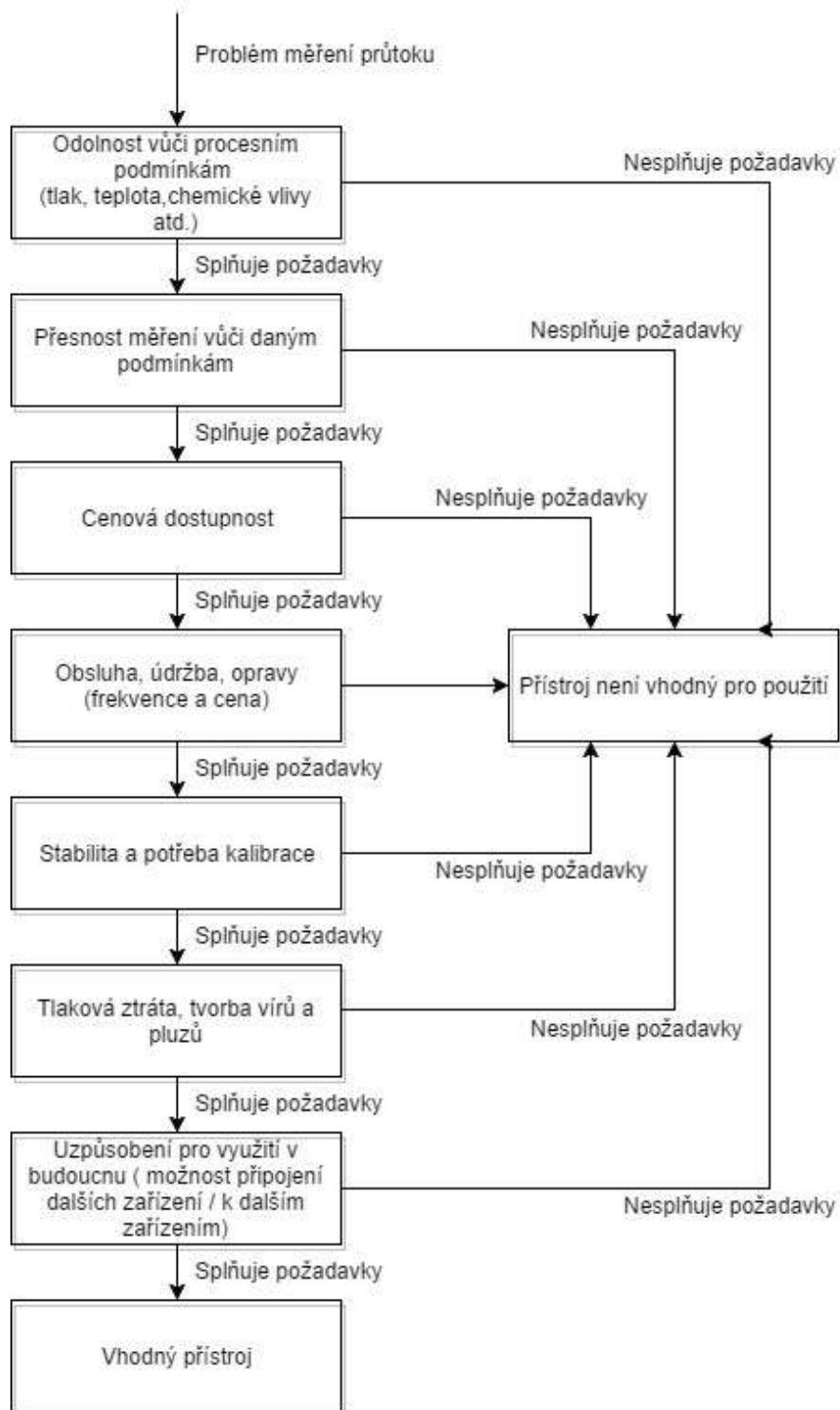
Horizontálně: a) bubliny, b) kapsy, c) vrstvy, d) zvlněné rozhraní, e) olejové skvrny, f) prstence

Vertikálně: a) bubliny, b) kapsy nebo olejové skvrny, c) stlačený, d) prstence e) jemně prstencovitý

Na obrázku č. 13 je možné vidět průtok vícefázového média, většina přístrojů je kalibrována na průtok pouze jednofázového média, a proto s větším počtem fází dochází k jejich větší nepřesnosti měření. Tato nepřesnost se dá značně snížit umístěním průtokoměru do vertikální polohy, kdy je počet nepřesností snížen až o 50%. (E+H, 2006)

6. Výběr vhodných přístrojů

V teoretické části byly představeny různé metody měření průtoku. Jelikož byla známa skutečnost měření vícefázové kapaliny, ne všechny přístroje byly vhodné. V následující části je vysvětlen důvod využití přístrojů pro měření v rámci praktické části. Pro přesnější výběr vhodného průtokoměru byl vytvořen diagram, kde byly popsány problémy při výběru.



Obrázek 15: Postup výběru průtokoměru

Nyní, když byl znám obecný postup při výběru vhodného průtokoměru, bylo možné určit ideální přístroje pro měření v praktické části. Z tohoto důvodu byla vytvořena tabulka, ve které byly sepsány všechny důležité specifikace průtokoměrů, zmíněných v teoretické části.

Tabulka 1: Shrnutí průtokoměrů

Typ měřidla		Rozsah průtoku [m ³ · h ⁻¹]	Tlaková ztráta	Přesnost % z rozsahu	Rozsah DN [mm]	Druh kapaliny		
Využitá metoda	Bližší specifikace					Č	Z	V
Objemové	Diskrétní	10 ⁻³ - 10 ²	Velká	> 0,1	2-150	✓	✗	!
	Spojité	10 ⁻³ - 10 ³	Střední až velká	0,1-2	2-150	✓	✗	!
Rozdíl Tlaků	Rychlostní sondy (Pitotova trubice)	1- 10 ³	Malá	2-5	25-2000	✓	✗	!
	Průřezová měřidla (Venturiho dýza)	10 ⁻⁴ - 10 ³	Střední až velká	0,5-2	10-4000	✓	!	!
	Plováčkové (rotametry)	10 ⁻⁴ - 10 ³	Střední	0,5-5	2-150	✓	✗	✓
Magneticko-indukční		10 ⁻³ - 10 ⁵	Žádná	0,5-2	1-3000	✓	✓	✓
Ultrazvukové	Na Dopplerově jevu	10 ⁻³ - 10 ⁴	Žádná	1-3	> 5	✗	✓	!
	Vyhodnocení doby průchodu	10 ⁻³ - 10 ⁴	Žádná	0,1-1	> 2	✓	!	✓
Vírové		10 ⁻¹ - 10 ⁴	Střední	0,5-1	15-400	✓	!	!
Tepelné	Termoanemometry	10 ⁻⁴ - 1	Střední	0,5-2	1-2500	✓	✗	✗
	Kalorimetry	10 ⁻⁵ - 1	Velká	0,5-2	1-2500	✓	✗	✗
Coriolisovy	Se zakřivenou trubicí	10 ⁻⁵ - 10 ³	Střední	0,1-0,5	1-250	✓	✓	✓
	S přímou trubicí	10 ⁻⁵ - 10 ³	Téměř žádná	0,5-2	1-250	✓	✓	✓

Poznámka Č = čistá tekutina, Z = znečištěná tekutina, V = viskózní tekutina

Poznámka ✓ = přístroj je určen pro danou tekutinu, ✗ = přístroj není určen pro danou tekutinu, != přístroj se dá využít pro danou tekutinu s omezením

Díky vytvořené tabulce bylo možné určit, které přístroje vybrat pro měření v této bakalářské práci. Jak již bylo zmíněno, hlavním úkolem měření bylo testování vícefázové kapaliny. Z tohoto důvodu bylo nutné počítat s různým složením testované kapaliny. Při pohledu do tabulky do sloupce „druh kapaliny-znečištěná kapalina“ bylo možné vidět, že pouze velmi malé množství přístrojů je schopno práce se znečištěnou kapalinou. Z výběru vyšly jako vhodné přístroje magneticko-indukční, ultrazvukové (Dopplerovy) a Coriolisovy. S jistým omezením pak jsou vhodné přístroje ultrazvukové (S vyhodnocením doby průchodu), vírové a na rozdíl tlaků (Průřezová měřidla).

Bohužel tyto přístroje byly sice vhodné na základě měření vícefázové kapaliny, avšak ne všechny plnily všechny předem určené podmínky. V případě průřezových měřidel byla možnost využití clony. Jelikož však není předem určen typ směsi, která bude proudit potrubím, mohlo by dojít k usazování nečistot za překážkou a v extrémních případech dokonce k ucpání v místě zúžení. Z tohoto důvodu bylo nutné vyřadit průřezová měřidla.

Nakonec bylo nutné vyřadit z výběru také Ultrazvukové přístroje založené na Dopplerově jevu. Tyto přístroje sice splňují téměř všechny podmínky, ale bohužel nejsou schopny měřit kapalinu bez nečistot. V práci je potřeba měřit také kapalinu v čistém stavu z důvodu porovnání odchýlení měřených hodnot v důsledku přidávání různých nečistot. Dalším důvodem jejich vynechání jsou jejich špatné výsledky v běžné praxi.

V závěru nám zůstaly čtyři přístroje vhodné pro využití v měřicí části práce. Tyto přístroje jsou Coriolisův, magneticko-indukční, vírový a ultrazvukový na principu vyhodnocení doby průchodu. Je možné vidět, že vírový a ultrazvukový jsou v případě znečištěné kapaliny schopné využití pouze s omezením. V případě ultrazvukového přístroje je dáno omezení poměrem nečistot a čisté kapaliny,

kdy se zvyšující se koncentrací nečistot, se snižuje přesnost signálu a v případě vysoké koncentrace mohlo dojít i k úplnému útlumu. Tento problém mohl nastat v případě vysoké koncentrace například vzduchových bublin, a proto bylo využití ultrazvukového průtokoměru omezeno na referenční průtok kapaliny bez příměsi vzduchu. Vírový průtokoměr má problémy se znečištěnými tekutinami hlavně v případě velkých nečistot, které by mohly ucpat vnitřní vířivé těleso.

V případě objemového průtoku vzduchu, který bude přidáván do již proudící vody, bylo potřeba sehnat samostatný průtokoměr. Tento průtokoměr neměl příliš velké požadavky, hlavním požadavkem byla cena. Prvotním nápadem bylo využití ultrazvukového průtokoměru, ovšem tento přístroj hrubě neodpovídal cenovým požadavkům. Proto byl vznesen požadavek na využití tepelného čidla z laboratoří katedry měření. Toto čidlo by bylo vhodné kvůli nulovým nákladům, avšak rozměry tohoto čidla byly příliš velké, a proto byl tento nápad zavrhnut. Jakožto poslední možnost se nakonec jevilo využití rotametru. Rotometry nejsou nikterak drahé a pro měření čistého média se hodí skvěle. Jediný problém u rotametru je, že musí být kalibrován pro měřené médium, jinak musí být výsledná hodnota přepočítána, aby odpovídala danému průtoku.

7. Testovací model

Pro bakalářskou práci bylo nutné vytvořit model, na kterém by probíhalo následné měření. Vytvoření modelu muselo splňovat základní požadavky, a proto jednotlivé části byly vybrány na základě dlouhého průzkumu a porovnávání parametrů. Hlavním kritériem celého modelu bylo využití v laboratorních podmínkách v rámci výuky. Z tohoto důvodu bylo nutné, aby se dal celý model rozložit na pracovní stůl v rámci učebny o rozměrech 150cm na 90cm.

7.1. Specifikace vybraných přístrojů

Všechny přístroje, využití v průběhu práce, byly zapůjčeny firmou „Endress+Hauser“, díky čemuž bylo možné přistoupit k okamžitému měření, avšak výběr přístrojů byl částečně omezen na základě dostupnosti.

V případě Coriolisova průtokoměru byl využit průtokoměr pod označením „Promass 80I“. Tento přístroj byl tvořen pouze jednou přímou trubicí vytvořenou z titanu a byl dostupný v rozmezí DN 8-80. Díky jediné trubici ovlivňoval méně tlakovou ztrátu a byl více hygienický než v případě dvou trubic ve tvaru U. K okamžitému zapůjčení byl přístroj o ideálním průměru DN15. Jeho rozsah hmotnostního průtoku byl o tomto vnitřním průměru dán v rozmezí 0 – 6500 kg · h⁻¹. Výstup mohl být nastaven buď pasivní 4 – 20mA nebo aktivní 0/4 – 20mA. Maximální měřená chyba byla ±0,175%.

Ultrazvukový průtokoměr pod označením „Prosonic flow 93T“ byl dodán jakožto přenosná verze. Výhodou této verze byla možnost instalování průtokoměru kdekoli v dosahu připojovacího kabelu mezi vysílačem a senzory. Senzory této verze byly schopné pracovat s potrubím o DN 15-65, kdy bylo nutné pouze přichytit senzor na potrubí (pro nižší čísla DN byl dodáván i s příslušným držákem) a následně nastavit vysílač na daný průměr a materiál trubky. Rozsah průtoků byl z důvodu různých vnitřních průměrů dán rychlostí s daným rozmezím 0 – 10m · s⁻¹. Maximální měřená chyba byla dána podle vnitřního průměru potrubí, kdy v případě použitého DN15 se jednalo o ±3% z čtení ± 5mm · s⁻¹.

V případě vírového průtokoměru byl dodán přístroj pod označením „Prowirl F200“. Jednalo se o průtokoměr v rozmezí DN 15-150. Rozmezí průtoku bylo závislé na měřené kapalině a vnitřním průměru. Minimální hodnota průtoku je dána hodnotou Re=5000, z technických specifikací byl přiložen výpočet za pomoci následující rovnice:

$$Re_{min} = \frac{v \cdot DN}{\nu} = \frac{\left(\frac{Q_V}{S}\right) \cdot DN}{\nu} = \frac{v \cdot 0,015[m]}{\frac{0,00102[Pa \cdot s]}{998 [kg \cdot m^3]}} \quad (35)$$

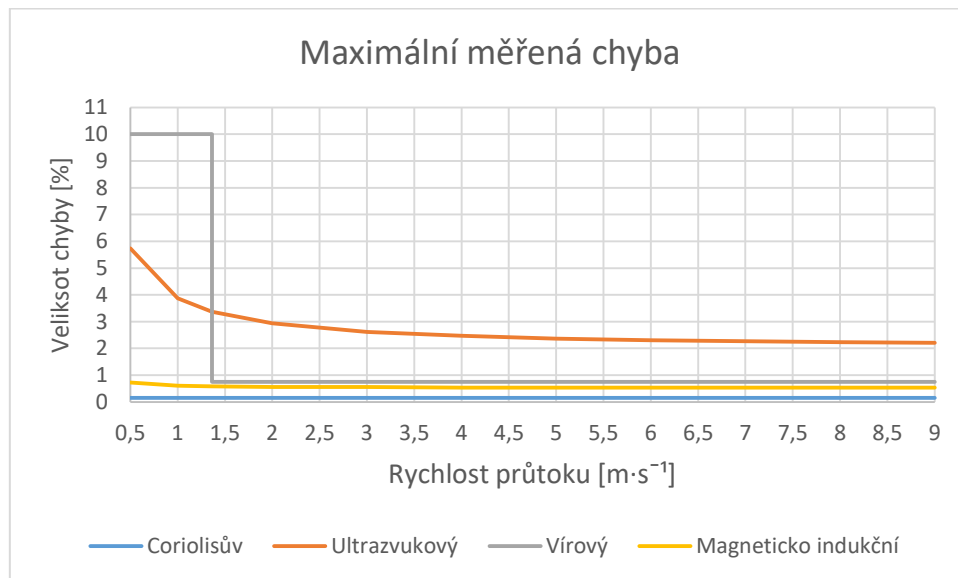
$$5000 = \frac{v[m \cdot s^{-1}] \cdot 0,015[m]}{0,00102[Pa \cdot s]}$$

$$5000 \doteq 0,341 [m \cdot s^{-1}]$$

Horní hranice průtoků byla pevně stanovena dle technické specifikace na $v_{max} = 9 m \cdot s^{-1}$. K zapůjčení bylo možné ihned získat přístroj o DN15. Tento přístroj měl výstup nastaven v rozmezí 4 – 20mA s chybou danou na základě Reynoldsova čísla. Pokud je hodnota čísla $Re > 20000$, hodnota chyby je pouze 0,75% v případě, že $5000 < Re < 20000$, byla chyba měření dána hodnotou 10%. Pokud by bylo číslo $Re < 5000$, nebylo by možné hodnotu změřit.

Magneticko-indukční průtokoměr označen výrobcem jako „Promag 50H“ je k dostání již od průměru DN2 až po DN150. Rozmezí rychlosti průtoku bylo u všech průměrů totožné a to v rozmezí $0,01 - 10 m \cdot s^{-1}$. Dostupný k testování byl však pouze přístroj o DN8. Jelikož nebylo předem známo, kdy by byl k dostání přístroj o větším DN, byl vzat do testování tento. Jak již bylo známo, rozmezí rychlosti proudění byla u všech přístrojů totožná, tím byl tedy ovlivněn pouze maximální objemový průtok, který mohl být s přístrojem použit, a také byla známá skutečnost, že s nižším DN bude rychlost proudění u přístroje vyšší. Výstup byl dán stejně jako u Coriolisova přístroje buď pasivně 0/4 – 20mA nebo aktivně 4 – 20mA. Maximální chyba je dána 0,5% čtené hodnoty $\pm 1 mm \cdot s^{-1} \pm 5\mu A$.

Maximální měřené chyby jednotlivých metod jsou zobrazeny na následujícím grafu. Z důvodu co nejvyšší přesnosti byla využita aplikace firmy „Endress+Hauser“, sloužící pro tyto účely.



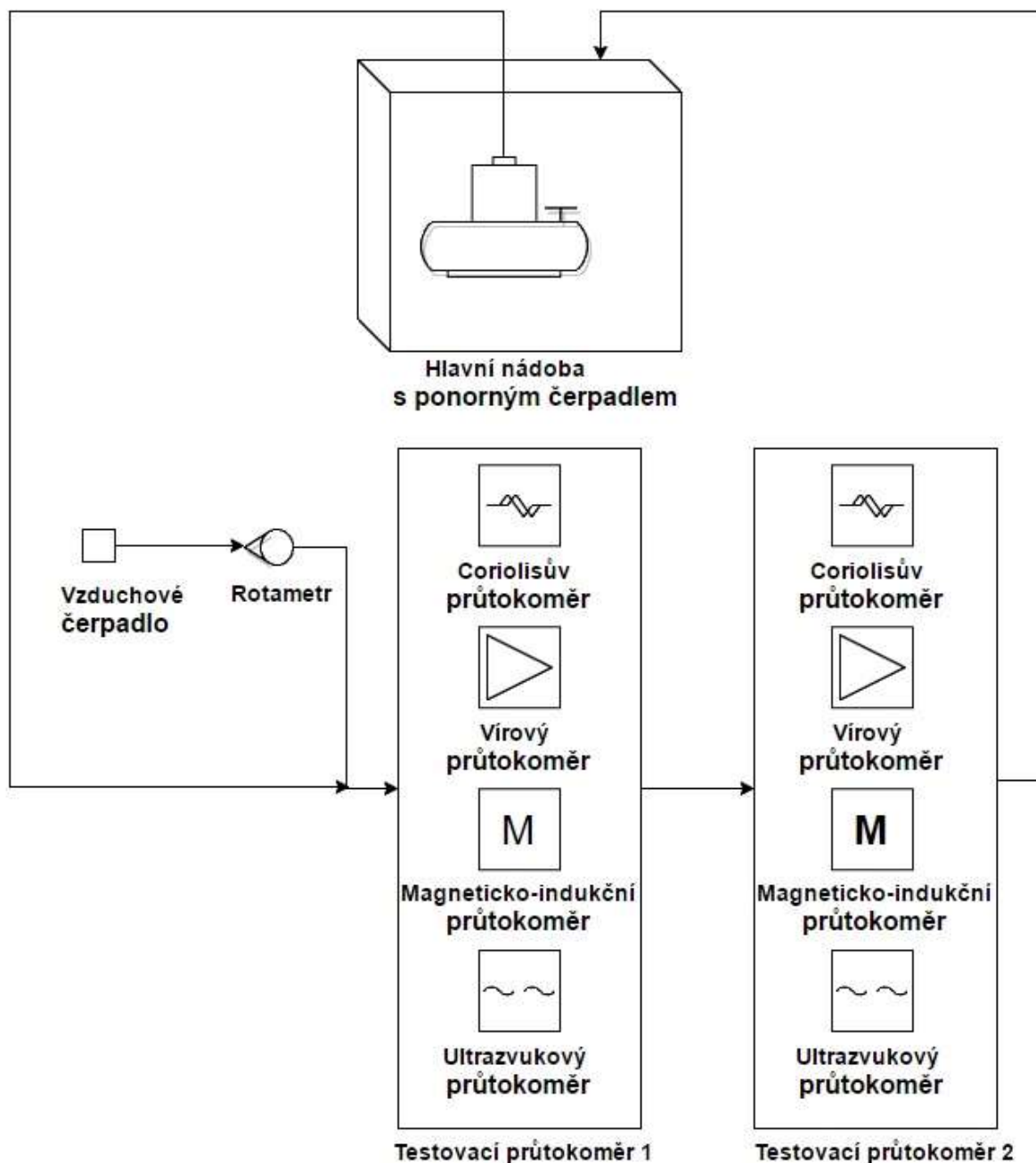
Obrázek 16: Graf měřené chyby v závislosti na rychlosti průtoku



Obrázek 17: Použité průtokoměry 1) Coriolisův, 2) Magneticko-indukční, 3) Vírový, 4) Ultrazvukový

7.2. Návrh modelu

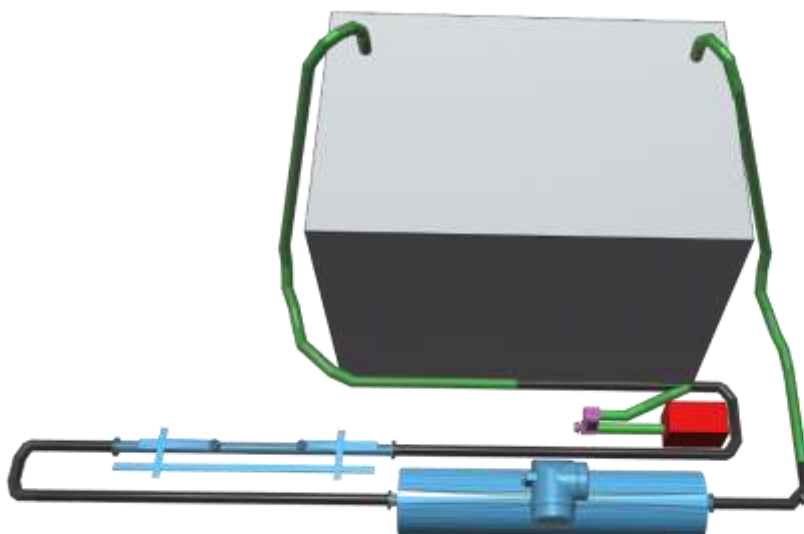
Před nákupem jednotlivých komponentů bylo nutné určit, jak by měl být následující model sestaven. Z tohoto důvodu bylo nejdříve vytvořeno blokové schéma, na kterém je určeno seřazení jednotlivých částí modelu, které byly nutné pro adekvátní měření a testování.



Obrázek 18: Blokové schéma testovacího modelu

Jak je na blokovém schématu možné vidět, prvotní návrh počítal s testováním všech průtokoměrů v různém zapojení do série po dvou (s ohledem na průtok vody), do kterých by postupně byl, v případě testování, vháněn objem vzduchu měřený na rotametru.

S ohledem na prvotní návrh byl také vytvořen základní 3D model, který zobrazuje možné postavení modelu na pracovním stole s ohledem na prostor pracovní desky. Je nutné podotknout, že programy na tvorbu těchto modelů mají mřížku pro tvorbu v rozmezí čtverce o délce stran 1m, a proto není přiložen obrázek označen mřížkou z rozměry. I v tomto ohledu je však celý model vytvořen tak, aby odpovídal skutečnosti. To znamená, že ačkoliv hodnoty mřížky byly pouze v rozmezí $1m \cdot 1m$, všechny části modelu byly vytvořeny v pravdivých rozměrech. Originál 3D modelu je možné shlédnout v příloze číslo 1.



Obrázek 19: 3D testovacího modelu Poznámka: Modrá = testovací průtokoměry, černá = potrubí z PVC, zelená = hadice z PVC, červená = vzduchové čerpadlo, růžová = rotametr, šedá = nádoba s vodou

7.3. Návrh přenosu a záznamu dat

Před samotnou stavbou modelu a následným měřením bylo nutné, aby byl určen způsob přenosu a záznamu dat. Nespornou výhodou užití přístrojů firmy „Endress+Hauser“ bylo, že mohou být uzpůsobeny pro komunikaci a záznam naměřených hodnot, a to dokonce několika různými způsoby. Každý ze zapůjčených přístrojů podporuje čtyři možné způsoby komunikace podle potřeby uživatele. Využít tedy bylo možné protokol „HART“, „PROFIBUS PA“, „PROFIBUS DP“, a „MODBUS RS485“.

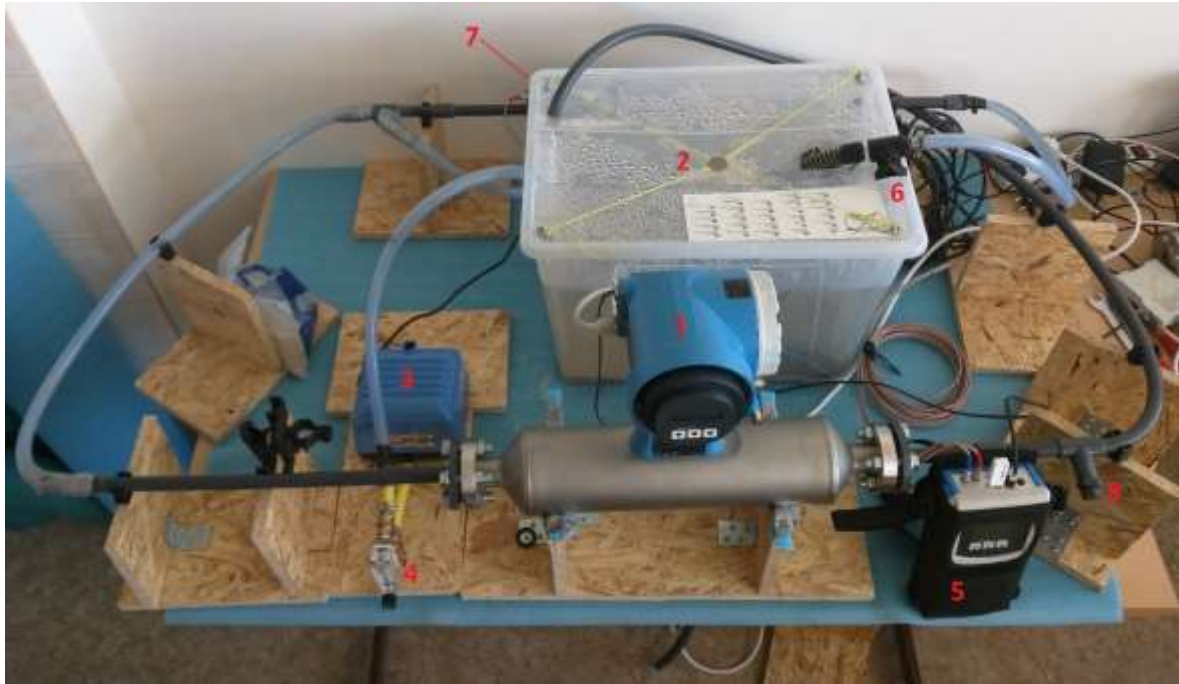
V tomto případě však komunikace využita nebyla a pracovalo se pouze na principu „master/slave“, což znamená, že řídicí stanice žádá o data z podřízeného zařízení, a to na tuto žádost odpovídá. Stanicí master v tomto případě byl ultrazvukový průtokoměr a slave byl jeden z dalších používaných průtokoměrů. Žádost o data probíhá cyklicky v určitém intervalu, v případě bakalářské práce byl interval každou 1 s. Data byla posléze odeslána za pomoci USB portu na flash paměť.

Hlavní výhodou této metody bylo, že ultrazvukový průtokoměr byl dodán s dekodérem a záznamníkem dat. Data byla průtokoměry převáděna na signál v podobě proudu o rozsahu 4-20 mA a následně za pomoci kabelu zaslána do záznamníku dat. Zde byl signál opět převeden a uložen do dokumentu formátu Excel, kde hodnoty byly odděleny za pomoci středníku (tzv. CSV formát neboli Comma-separated values, hodnoty oddělené čárkami).

Ačkoliv tato metoda přinášela velkou výhodu s úsporou času, kdy nebylo potřeba vytvářet speciální programy na záznam dat, přinášel i několik nevýhod. První byla nemožnost zapojení všech přístrojů naráz, a tím jejich otestování v jednu chvíli. To ovšem nebyla příliš velká nevýhoda, neboť dostupný prostor nedovoloval tuto možnost, avšak do budoucna by se mohlo jednat o problém. Druhou, menší nevýhodou, byla nutnost přenastavení záznamníku při záměně testovacího průtokoměru.

7.4. Realizace a výběr komponentů

Díky vytvořenému 3D modelu bylo možné přistoupit k nákupu komponentů a finální realizaci sestavení. Na obrázku číslo 18 může být k vidění, že původní model se od následné realizace liší v některých detailech. První důležitou změnou bylo vynechání ultrazvukového průtokoměru z měření v případě směsi voda-vzduch, z důvodů, že v případě vyššího obsahu nečistot by došlo k utlumení signálu a hodnota průtoku by nebyla naměřena. Proto byl využit jakožto referenční průtokoměr pro určení hodnoty průtoku bez vzduchové složky.



Obrázek 20: Realizovaný model

- 1) Coriolisův průtokoměr, 2) Nádoba s kapalinou a čerpadlem, 3) Vzduchové čerpadlo, 4) Rotametr, 5) Ultrazvukový převodník se záznamníkem dat, 6) Regulační ventil, 7) Ultrazvukový průtokoměr, 8) Výpustný ventil

Následující text pojednává důkladně o důvodech, proč byly jednotlivé komponenty zvoleny a dále o jednotlivých problémech v případě jejich výběru. Ještě před výběrem komponentů bylo nutné vyřešit ukotvení průtokoměrů a potrubí na pracovním stole. Jak je z obrázku možné vidět, toto ukotvení bylo vyřešeno za pomoci sestavení podpůrných stojanů ze dřeva. Díky tomu byl systém ukotven tak, že jednotlivé průtokoměry a potrubí byly ve stejné výšce, díky čemuž byly omezeny případné oscilace potrubí, a tím snižené chyby, které by tímto mohly vzniknout.

7.4.1. Čerpadlo

Prvním dílem pro funkční model bylo čerpadlo o dostatečném výkonu, který však nesměl být příliš velký, aby rychlost proudění v potrubí nepřesahovala měřící rozsah použitých přístrojů. Z technických dokumentů jednotlivých přístrojů byla vytvořena následující tabulka, která udává rozsah rychlostí, pro správnou funkci používaných průtokoměrů.

Tabulka 2: Rozsah rychlostí průtoku pro použité přístroje

Druh průtokoměru	Coriolisův průtokoměr	Ultrazvukový průtokoměr	Magneticko-indukční průtokoměr	Vírový průtokoměr
$v_{min} [m \cdot s^{-1}]$	0	0	0,01	0,34
$v_{max} [m \cdot s^{-1}]$	10,24	10	10	9

Z tabulky je možné vidět, že rozmezí průtoků pro správné testování bylo mezi $0,19 m \cdot s^{-1}$ až $9 m \cdot s^{-1}$. Ideální situací ovšem je, pokud maximální hodnota průtoku je někde uprostřed těchto hodnot, tedy $4,5 m \cdot s^{-1}$

Dále bylo dáno, že čerpadlo musí být schopno pojmout pevné nečistoty typu písek nebo kal, a proto bylo nutné, aby čerpadlo bylo kalové. Z těchto parametrů bylo vybráno čerpadlo firmy „T.I.P. Pumpen“, pod označením „DIO 45/13“. Toto čerpadlo je schopné pojmout nečistoty až do velikosti $2 mm$ a za ideálních podmínek dosahuje maximálního průtoku $2700 l \cdot h^{-1}$, z čehož lze vypočítat rychlost proudění v ideálních podmínkách. Ideálními podmínkami je myšlen průtok s nulovou dopravní výškou a nulovým protitlakem.

$$v = \frac{Q_V}{S} = \frac{Q_V}{\pi \cdot r^2} = \frac{2700[l \cdot h^{-1}]}{\pi \cdot \left(\frac{15}{2}\right)^2 [mm]} = \frac{2,7[m^3 \cdot h^{-1}]}{\pi \cdot 0.0075^2 [m]} = 4,24[m \cdot s^{-1}] \quad (366)$$

Z rovnice je vidět, že rychlost proudění je v rozmezí požadovaných hodnot a dokonce se přibližuje k ideální hodnotě, proto bylo toto čerpadlo vybráno pro tuto práci. Jednou z dalších výhod tohoto čerpadla byla možnost regulování množství proteklé kapaliny díky již zabudovanému regulačnímu ventilu. Díky této skutečnosti bylo možno zregulovat rychlost průtoku po obdržení magneticko-indukčního přístroje o DN=8, tak aby se dala upravit rychlost proudění i pro tento přístroj.

7.4.2. Testovací potrubí

Základní částí při tvorbě modelu bylo vytvoření testovacího okruhu v tomto případě tvořeného potrubím o DN=15. Původním návrhem pro toto potrubí byly ocelové trubky nařezané a případně zahnuté do potřebných délek, které by byly poté svařeny do jednoho celku. Ocelové potrubí by bylo vhodné díky vysoké odolnosti a stabilitě, avšak nesplňovalo by kritérium pro snadné užití v laboratorních podmínkách díky své vysoké hmotnosti a nemožnosti úpravy v případě přesunu na plochu o jiných rozměrech.

Z tohoto důvodu bylo vybráno potrubí z PVC pro rovné délky. Pro části potrubí, kde bylo potřeba větší flexibility, byly zvoleny hadice taktéž z PVC. Délky rovných délek byly z důvodu výměny jednotlivých přístrojů pro jejich testování určeny na základě nejvyšší hodnoty. Tyto hodnoty jsou zobrazeny v následující tabulce číslo 3. V technických materiálech jsou hodnoty udávány ve vztahu k potrubí, to znamená, že hodnoty se liší podle jednotlivých vnitřních průměrů užívaného potrubí.

Tabulka 3: Požadavky na rovné délky potrubí pro jednotlivé přístroje

Druh průtokoměru	Coriolisův průtokoměr	Ultrazvukový průtokoměr	Magneticko-indukční průtokoměr	Vírový průtokoměr
l_{in} [cm]	0	22,5	4	37,5
l_{out} [cm]	0	4,5	1,6	7,5

Jelikož pracovní plocha nedovolovala zapojení všech přístrojů v jednu chvíli, musela být zvolena jednotná délka potrubí. Proto jakožto příslušné délky l_{in} a l_{out} byly využity nejvyšší hodnoty z předchozí tabulky, k nimž bylo pro jistotu přičteno 10% této délky. Následně došlo ještě k zaokrouhlení pro lepší nařezání potrubí. Výsledné délky poté byly 10 cm v případě l_{in} a 0,45 cm v případě l_{out} .

Díky rovným délkám bylo také možné vybrat hadice pro místa s ohybem. Prvotní nároky na hadice byly pouze takové, aby bylo možné je spojit dohromady s potrubím pro vytvoření okruhu a aby v případě tlaku vytvořeného provozem čerpadla nedošlo k jejich protržení. Ovšem v průběhu stavby bylo nutné přidat ještě poslední nárok a to na transparentnost hadic. Tento požadavek byl přidán z důvodu pozorování pohybu vířivé kapaliny v případné výuce.

Kvůli této skutečnosti byla zakoupena čirá hadice, která byla poté rozdělena na dvě části. První část o délce 75cm, vyvedena z čerpadla do potrubí před ultrazvukovým průtokoměrem, sloužící pro pozorování pohybu čisté vody, nebo vody a pevných částic v kapalině. Samotný ultrazvukový průtokoměr je připevněn k potrubí dlouhému 40cm.

Druhá 100cm dlouhá část hadice byla napojena za příměsí vzduchu zmíněné v kapitole 6.4, jejíž napojení se nacházelo za l_{out} ultrazvukového průtokoměru za pomoci „T“ spojky. Tato hadice naopak sloužila k pozorování pohybu bublin, popřípadě vzduchových bublin + pevných částic. Vývod této hadice poté vedl do potrubí ústícího do druhého průtokoměru.

Za druhým testovaným průtokoměrem byl pak v dostatečné vzdálenosti umístěn výpustný ventil sloužící k vyprázdnění potrubí v případě výměny testovaných přístrojů, a jakožto finální část byla umístěna netransparentní hadice vedoucí zpět do nádoby s kapalinou o délce 190cm.

7.4.3. Zásobník vody

Dalším krokem bylo zvolení vhodné nádoby fungující jako zásobník vody. Tato nádoba musela mít dle nároků dostatečný objem, aby bylo možné zaplnění celého testovacího potrubí, avšak v nádobě muselo zůstat dostatečné množství kapaliny, které by zaručilo úplné ponoření čerpadla. Dále byl požadavek na celkovou transparentnost nádoby, z důvodu pozorování míchání kapaliny s pevnými částicemi a následným čerpáním do testovacího potrubí. Jelikož byly známy rozměry čerpadla, které byly $l_d=16,5$ cm, $l_s = 15,5$ cm a $l_v = 26,5$ cm a také známá skutečnost, že v případě pevných nečistot, bude docházet k usazování těchto částic na dně nádoby, byla dána podmínka minimálně 2cm mezi dnem čerpadla a dnem nádoby.

Z tohoto důvodu byla vybrána nádoba s označením „SAMLA“ od firmy „IKEA“. Tato nádoba vyrobená z čírého plastu má objem 65 l a její rozměry jsou $l_d = 39$ cm, $l_s = 57$ cm a $l_v = 42$ cm, dále se dodává s ochranným vrchním krytem, do kterého byly následně vyvrtány otvory, díky nimž bylo možné uchytit čerpadlo nade dnem nádoby a ukotvit hadici vedoucí kapalinu zpět, která by mohla díky proudu vody uvnitř vylétnout a zaplavit laboratoř.

7.4.4. Vzduchové čerpadlo

Hlavním úkolem tohoto čerpadla, je dodání dostatečného množství vzduchu pro vytvoření vzduchových bublin. Při výběru vhodného přístroje se objevilo mnoho problémů, například špatná kompatibilita s již vytvořeným potrubím, z důvodu toho, že většina vzduchových čerpadel na českém trhu je vyráběna pro provzdušňování akvárií. Jelikož jsou tyto přístroje stavěné pro provzdušnění stojatých vod, ve kterých působí pouze hydrostatický tlak, objevuje se u nich problém s výkonem. Přes spoustu testování bylo bohužel zjištěno, že i čerpadla o průtoku $400 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$ nevyvinou dostatečný tlak, aby dokázala daný objem vzduchu vhnět do potrubí, v němž protéká kapalina.

Z výše uvedených příčin bylo zakoupeno čerpadlo s označením „V-30“ od firmy „Hailea“, které dokázalo vyvinout dostatečný výkon, aby došlo ke smíchání vzduchu a kapaliny. Výrobce uváděný objemový průtok vzduchu je $1800 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$, avšak v ideálních podmínkách, bez jakéhokoliv protitlaku, bylo čerpadlo schopné do prázdného potrubí vyslat pouze $1300 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$. I přesto bylo však toto čerpadlo nejvhodnější pro práci, zvláště díky výkonu, kdy bylo možné testovat za pomoci rotametru chování průtokoměrů s různým množstvím přimíchaného vzduchu.

8. Měření

Z důvodu relevantnosti všech výsledků, bylo nutné zajistit totožné podmínky v měření pro všechny měřicí přístroje. Bylo zvoleno několik situací blízkých k reálným podmínkám, které by mohly nastat. V průběhu měření docházelo k ohřívání kapaliny činností čerpadla, kdy se čerpadlo svým chodem zahřívá a je ochlazováno pouze svým okolím, čímž dochází k výměně tepla mezi ním a okolím. Díky této skutečnosti se mění také fyzikální vlastnosti kapaliny. Kapalina se zvyšující teplotou mění svůj objem, viskozitu a hustotu. Tím se mění podmínky měření a tím i objemový průtok naměřený průtokoměry. Ačkoliv se hodnoty měnily s rostoucí hodnotou na všech přístrojích, nebylo zaručeno, že rostoucí teplota bude ovlivňovat všechny přístroje totožně. Z tohoto důvodu bylo možné provádět pouze jedno měření za den, a to po dobu maximálně čtyř hodin. Díky tomu bylo docíleno totožných podmínek všech měření a je možné výsledky považovat za relevantní.

8.1. Funkčnost rotametru

Funkce rotametru je závislá na tlaku. Většina rotametru je čistě mechanická, stejně tak byl mechanický rotametr využívaný v rámci bakalářské práce. V důsledku této skutečnosti nebylo možné zaznamenávat data za pomoci elektrického proudu a poté za pomoci převodníku určovat finální hodnotu. V práci byly k dispozici dva rotametry. První rotametr byl kalibrován na průtok vody a to v rozmezí od $1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ do $7 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Díky tomu jej nebylo možné využít pro měření průtoku vzduchu ani s případným přepočtem hodnoty na průtok vzduchu, neboť čerpadlo není schopné takového výkonu, aby dodalo dostatečný objem vzduchu. Druhý rotametr byl správně kalibrován na měření vzduchu. Jeho rozmezí bylo od $1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ do $20 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$.

Jak již bylo zmíněno, funkce rotametru je závislá na tlaku, tím se však dostavují i jisté nedostatky v případě měření množství vzduchu přidávaného do proudící kapaliny. Jelikož proudící kapalina vytváří protitlak vůči proudu vzduchu, může nastat situace, kdy tlak kapaliny bude příliš velký vůči vzduchu, a v tomto případě bude průtok vzduchu omezen. Hraniční hodnota na testovacím potrubí je v tomto případě rozdílná dle použitého přístroje. V případě magneticko-indukčního průtokoměru je daná hodnota rovna $1,13 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, ostatní přístroje jsou díky většímu DN schopny pracovat se vzduchem i za větších průtoků. Jejich maximální hodnota průtoku je rovna $1,47 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Pokud je tato hodnota překročena, dochází k utlumení tlaku v rotametu z důvodu nedostatečného výkonu čerpadla, a díky tomu je průtok vzduchu nulový. V opačném případě, kdy je naopak příliš velký tlak vzduchu, dochází k uvolňování v podobě dávek, a díky tomu k oscilacím na

rotometru. Tyto oscilace jsou způsobeny náhlým poklesem tlaku ve vzduchovém potrubí, díky uvolnění většího množství vzduchu do proudící kapaliny. Tyto oscilace jsou ke zhlédnutí na videu v příloze číslo 2. Z tohoto důvodu musely být hodnoty proudící kapaliny i proudícího vzduchu voleny tak, aby došlo k ustálení tlaku mezi oběma složkami.

8.2. Coriolisův průtokoměr

Coriolisův průtokoměr byl nejpřesnějším přístrojem v případě čisté kapaliny. Díky této skutečnosti posloužil k seřízení a kalibrování ultrazvukového průtokoměru, kdy byl použit jakožto referenční hodnota, ke které se postupně ultrazvukový průtokoměr přiblížil až na rozdíl 0,7%. Tato kalibrace probíhala tak, že docházelo k postupnému upravování konstant na ultrazvukovém přístroji, dokud nebylo dosaženo hodnoty, kterou již nebylo možné vylepšit, a další změna kterékoliv konstanty by způsobila zhoršení.

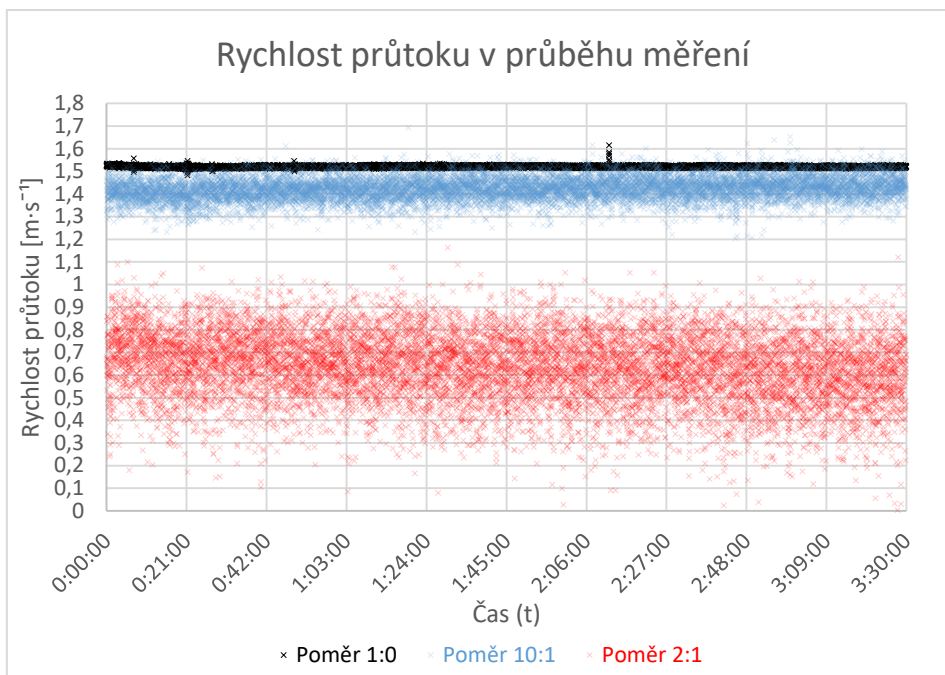
Jelikož se jednalo o hmotnostní průtokoměr, předpokladem byla jeho špatná funkce v případě směsi vody se vzduchem. Jak bylo v teoretické řešerši vysvětleno, Coriolisův průtokoměr určoval hmotnost kapaliny, která prošla potrubím za čas. Z této skutečnosti také vychází rychlost proudění, která se určuje z následujícího vztahu.

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot S} \quad (37)$$

Skutečnost, že je rychlost průtoku určována z hmotnosti a hustoty kapaliny, již předem určila špatné výsledky v případě vícefázových kapalin. V případě rozptýlených bublin v potrubí docházelo ve chvíli oscilace ke změně amplitudy z důvodu nižší hustoty vzduchu, nežli tomu bylo v případě průtoku pouze vody. V případě průtoku vody se vzduchem tak mohly nastat dvě situace. První situace se nazývá „bublínkový efekt“, v tomto případě dochází, kvůli volnému rozptýlení bublin v kapalině, k pohybu bublin v rozdílném směru než samotné kapaliny, což způsobovalo změnu amplitudy, čímž se rychlost a hmotnostní průtok kapaliny snižovaly. Druhým případem je „rezonanční efekt“. V tomto případě se jedná o tzv. pozastavené bubliny, jedná se o případ, kdy byla chyba měření způsobena jejich výraznou stlačitelností, která sice neovlivní tolik jejich pohyb v kapalině, avšak ovlivňuje frekvenci v potrubí. To zapříčiňuje pozitivní chyby, které jsou opačné k efektu samotných bublin.

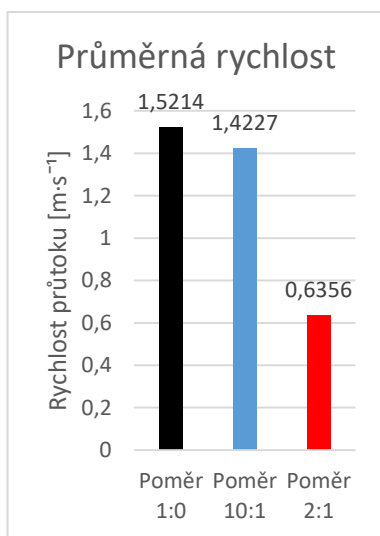
8.2.1. Orientační objemový průtok vody $1\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Pro první testování bylo jakožto orientační objemový průtok zvoleno množství vody $1\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, tento průtok dovozoval s používaným vzduchovým čerpadlem testovat dva různé poměry vody a vzduchu. V tomto případě se jednalo o poměry 1:0, 10:1 a 2:1, kdy první číslo udává množství vody a druhé množství vzduchu, jenž proudilo v potrubí. Konstantní průtok vody byl měřen za pomoci ultrazvukového průtokoměru. Na následujícím grafu je zobrazeno rozmezí měřených dat v průběhu měření pro jednotlivé poměry.

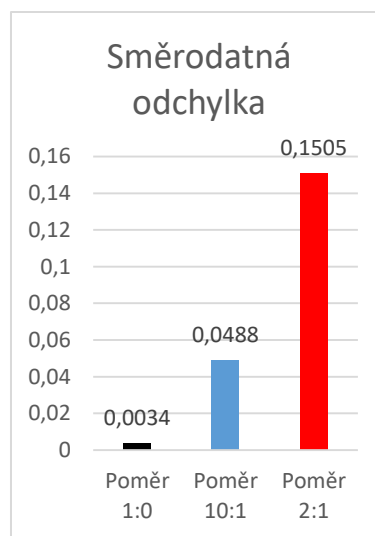


Obrázek 21: Graf rychlosti průtoku v průběhu měření Coriolisova průtokoměru pro objemový průtok vody $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Z grafu bylo možné vidět, že v případě zvyšujícího se poměru vzduchu v kapalině, klesá rychlost proudění a rozptyl jednotlivých hodnot se zvedá, čímž dochází ke zvýšení směrodatné odchylky. Přesnější hodnoty jednotlivých průtoků a odchylek jsou patrné z následujících grafů. Dále je přiložen graf zobrazující velikost směrodatné odchylky pro jednotlivé poměry. Hodnoty jednotlivých grafů byly zaokrouhleny na čtyři desetinná místa.



Obrázek 22: Průměrná rychlost proudění v průběhu měření pro Coriolisův průtokoměr



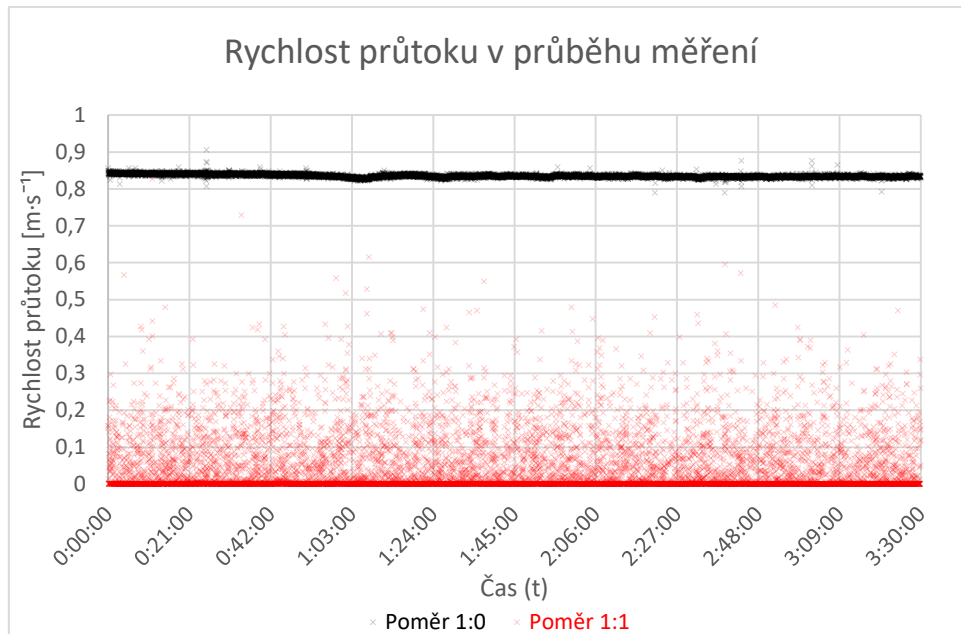
Obrázek 23: Směrodatná odchylka z celého měření

Jak bylo možné z kompletních hodnot vidět, v případě čistého média se hodnoty drží v okolí rychlosti $1,52 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a jejich směrodatná odchylka byla velice malá. Se zvětšujícím se množstvím

vzduchu se ovšem přesnost měření začala snižovat a rychlost byla udávána nižší, a to přibližně v poměru složek.

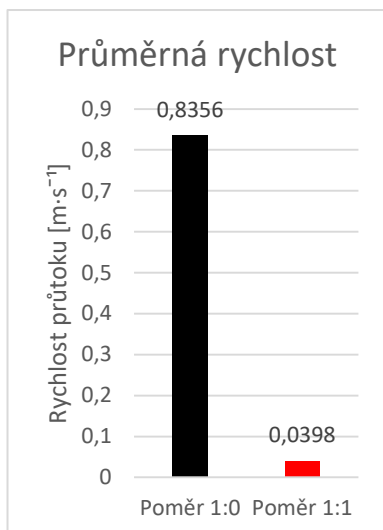
8.2.2. Orientační objemový průtok vody $0,54 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Průtok o objemu vody $0,54 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ byl zvolen, jelikož se nejednalo o příliš malý průtok, který by nebylo možné přístroji měřit a zároveň se jednalo o jeden z prvních průtoků, do kterého bylo možné vehnat stejný poměr vzduchu a vody. Díky tomu bylo možné měřit rychlost průtoku v poměru 1:1. A otestovat tedy extrémní případy vícefázových kapalin.

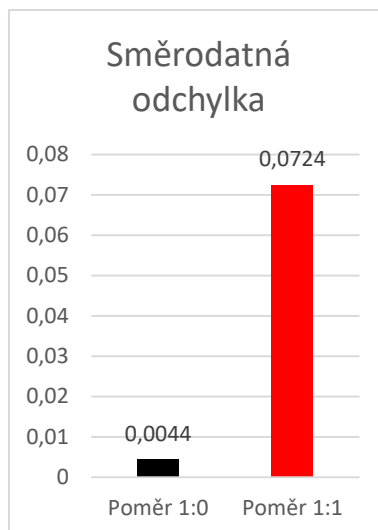


Obrázek 24: Graf rychlosti průtoku v průběhu měření Coriolisova průtokoměru pro objemový průtok vody $0,54 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Při pohledu na graf je možné vidět, že zatímco v případě nízkého průtoku přidaného vzduchu je hodnota spíše lineární, v případě poměru 1:1 jsou hodnoty značně rozptýleny a ve většině případů byla rychlost proudění skoro nulová, ne-li přímo nulová.



Obrázek 25: Průměrná rychlost proudění v průběhu měření pro Coriolisův průtokoměr



Obrázek 26: Směrodatná odchylka z celého měření

Z grafu průměrné rychlosti můžeme vidět, že v případě celého měření se průměrná hodnota rychlosti pohybovala na tak nízké hranici, že pokud by opravdu rychlost byla takto nízká, například vírový průtokoměr by již nebyl schopen měření.

S ohledem na tabulku směrodatné odchylky, je ale nutno podotknout, že podle získaných dat se jedná o menší směrodatnou odchylku, než v případě poměru 2:1. Tato skutečnost má ovšem jednoduché odůvodnění. Jelikož z předchozích měření s ostatními poměry víme, že hmotnost proudící kapaliny se snižuje s přidanou vzduchovou složkou, v případě tohoto měření docházelo občas k chybám, kdy se hodnota zobrazovaná a přenášená z přístroje pohybovala v záporných číslech. V případě proudění v potrubí, kdy byla kapalina vhnána čerpadlem jedním směrem, nebylo možné, aby byla výsledná rychlost záporná. Situace, kdy je rychlost na přístroji záporná, by totiž znamenala, že kapalina proudí potrubím v opačném směru. Z tohoto důvodu musela být logicky zaznamenaná hodnota rychlosti průtoku nulová.

Díky skutečnosti nulového průtoku a znalosti z předchozích případů, že odchylka od průměrné rychlosti může být kladná i záporná, bylo jisté, že ani v tomto případě nemůže být odchylka stejně jako rychlost záporná. Tím pádem se velikost minimálního průtoku mohla rovnat pouze nule, a proto je i odchylka menší, než v případě poměru voda-vzduch 2:1.

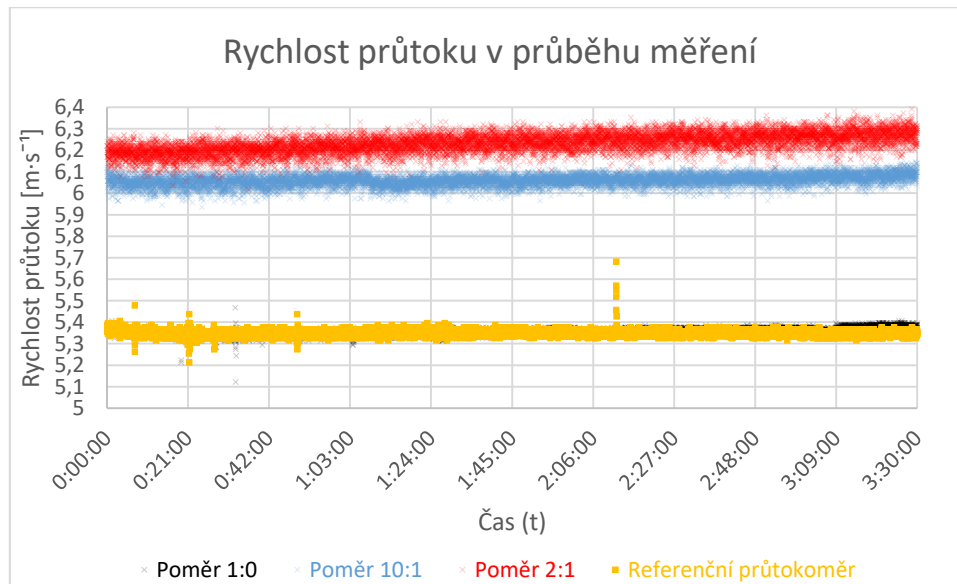
8.3. Magneticko-indukční průtokoměr

V případě magneticko-indukčního průtokoměru nebylo možné porovnávat hodnoty s referenčním průtokem z Coriolisova průtokoměru. Důvodem je, že v případě nižšího vnitřního průměru byla i rychlost průtoku vyšší, a to rozdílem druhých mocnin vnitřních průměrů. Dalo se tedy očekávat, že průtok magneticko-indukčního bude díky menšímu průměru vyšší. Přepočteno jednoduchým výpočtem by měla hodnota magneticko-indukčního být o $\cong 3,5156 \cdot X$ větší než hodnota z ostatních přístrojů. Z tohoto důvodu byl do grafů zanesen referenční průtok Coriolisova průtokoměru vynásoben touto hodnotou.

8.3.1. Orientační objemový průtok vody $1\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

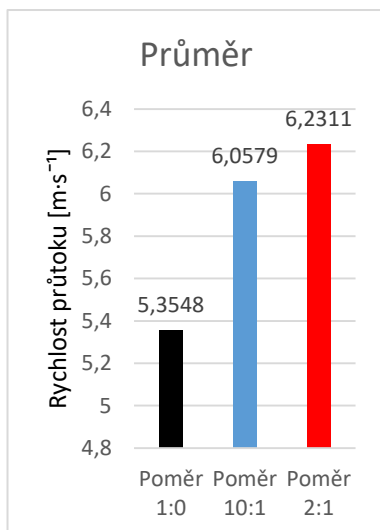
Orientační objemový průtok vody o velikosti $1\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ je v případě magneticko-indukčního průtokoměru hraniční hodnotou pro možnost testování více složení voda-vzduch. Ovšem i o takto

nízkém průtoku nebylo možné vyvarovat se možných chyb vzniklých z důvodu tlaku. Jak bylo zmíněno v kapitole 8.2, právě vnitřní tlak v potrubí je důležitou součástí pro přesné určování objemu vzduchu. Bohužel v tomto případě docházelo k oscilacím rotametru, a proto nebylo možné zajistit, že poměr voda - vzduch 2:1 odpovídá skutečnosti. Bylo možné, že objem vzduchu mohl být nižší než průměrná hodnota oscilací na stupnici rotametru. Do proudící kapaliny byla opět přidána plynná složka v následujících poměrech voda-vzduch 1:0, 10:1 a 2:1.

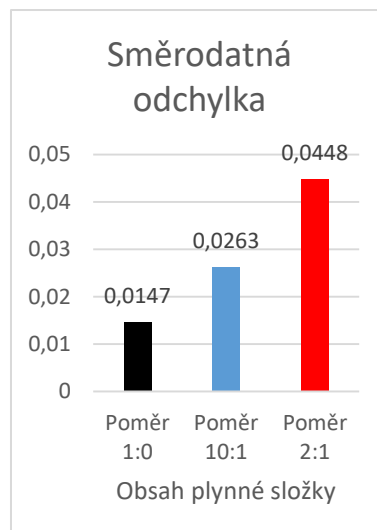


Obrázek 27: Graf rychlosti průtoku v průběhu měření magneticko-indukčního průtokoměru pro objemový průtok vody $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Při pohledu na graf je ihned k vidění rozdíl mezi magneticko-indukčním a Coriolisovým průtokoměrem. V případě magneticko-indukčního průtokoměru se rychlost proudění se zvyšující se plynnou složkou taktéž zvyšuje. Opět jsou přiloženy průměry a odchylky pro celý soubor měření, taktéž zaokrouhleny na čtyři desetinná místa.



Obrázek 28: Průměrná rychlost proudění v průběhu měření pro magneticko-indukční průtokoměr

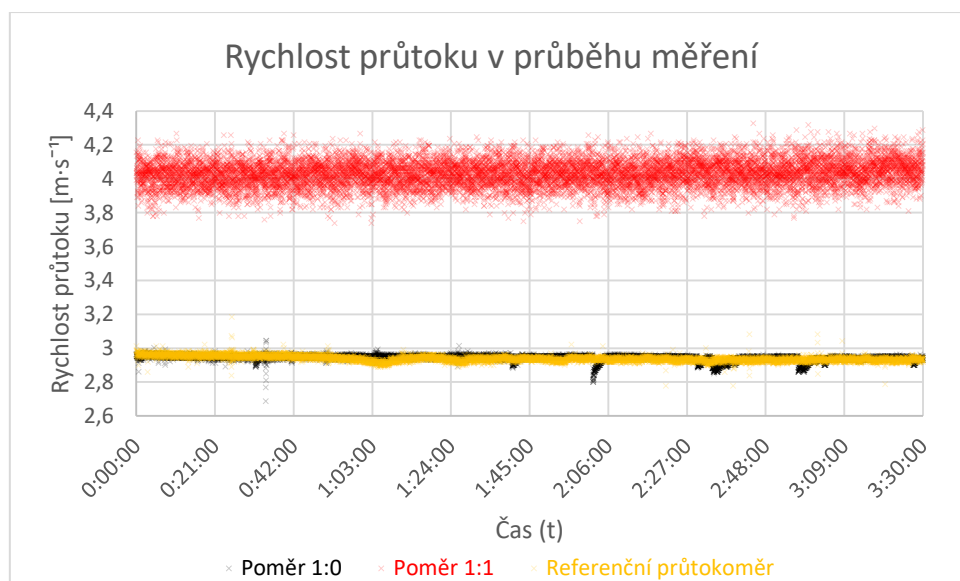


Obrázek 29: Směrodatná odchylka z celého měření

V případě zhlédnutí grafu odchylky je k vidění, že zatímco u čisté kapaliny není směrodatná odchylka v případě zaokrouhlení nulová, tak v případě zvýšené složky se nezvyšuje nikterak drasticky. Důvodem může být, že jak bylo zmíněno výše, neodpovídal poměr dané skutečnosti. Díky tomu je ovlivněna i směrodatná odchylka.

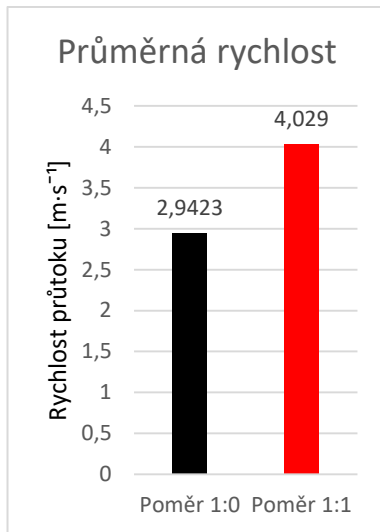
8.3.2. Orientační objemový průtok vody $0,54\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Objemový průtok vody o velikosti $0,54\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ byl velice vhodný vzhledem k použitému DN8 u přístroje. V případě magneticko-indukčního je přesnost měření podmíněna celkovým zaplněním potrubí. Pokud by byl vnitřní průměr větší a rychlost takto nízká, mohlo by docházet k vrstvenému průtoku, a tím by byl narušen měřicí princip.

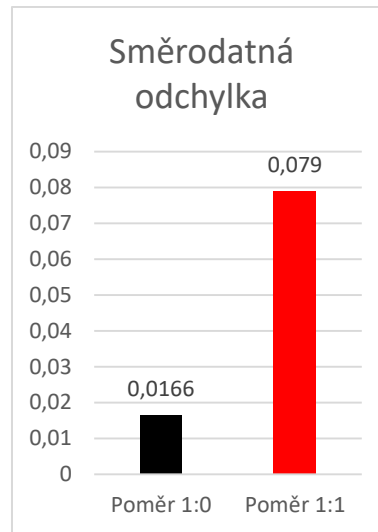


Obrázek 30: Graf rychlosti průtoku v průběhu měření magneticko-indukčního průtokoměru pro objemový průtok vody $0,54\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Při pohledu na rychlost průtoku v případě čisté kapaliny docházelo od jistého času k periodickým poklesům rychlosti. Důvodem této skutečnosti může být, že docházelo k protáčení čerpadla z důvodu pouze částečného otevření regulačního ventilu. Tato skutečnost také ovlivnila následující hodnoty ve sloupcích poměru voda vzduch 1:0.



Obrázek 31: Průměrná rychlost proudění v průběhu měření pro magneticko-indukční průtokoměr



Obrázek 32: Směrodatná odchylka z celého měření

Pokud srovnáme sloupce, vidíme, že rychlost v případě poměru 1:1 byla větší, téměř totožně jako poměr látek. Hodnota směrodatné odchylky je mnohem větší než v případě poměru 2:1. Tím by mohla být potvrzena domněnka, že v daném případě neodpovídal odhadnutý objem vzduchu skutečnému poměru.

8.4. Vírový průtokoměr

Výhodou vírového průtokoměru oproti magneticko-indukčnímu byla možnost srovnání výchozích hodnot s ideální hodnotou z Coriolisova průtokoměru. Přesnost měření je u Vírového průtokoměru podmíněna Reynoldsovým číslem. V případě požadavku na co nejvyšší přesnost, je potřeba zajištění aby $Re > 20000$. Je nutné podotknout, že výsledná hodnota objemového průtoku, a tím i rychlosti, byla nižší než u ostatních přístrojů. Důvod této skutečnosti mohl být nejspíše dán tím, že se rychlost proudění pohybovala spíše na spodní hranici měřicího rozsahu rychlosti průtoku. Z tohoto důvodu mohlo docházet k horší tvorbě vírů v případě kapaliny, a proto docházelo k podměrování přístroje.

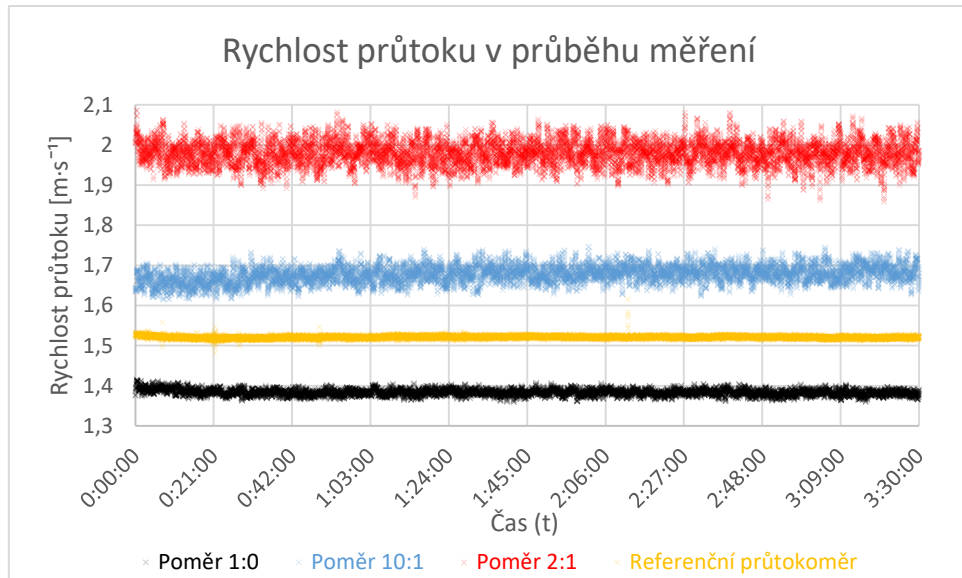
8.4.1. Orientační objemový průtok vody $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

S užitím objemového průtoku vody o velikosti $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ bylo možné stejně jako u Coriolisova průtokoměru zajistit více poměrů voda-vzduch. Dále, jelikož $DN_{cor} = DN_{vir}$, bylo možné porovnat hodnotu rychlosti proudění i s referenční hodnotou. Opět byla do protékající kapaliny přidána vzduchová složka v poměru voda-vzduch 1:0, 10:1 a 2:1. Před samotným porovnáním hodnot je nutné určit, o jak přesné měření se jednalo výpočtem Reynoldsova čísla.

$$Re = \frac{vDN}{\nu} = \frac{\left(\frac{Q_V}{S}\right) \cdot DN}{\nu} = \frac{\left(\frac{1[\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]}{3,14 \cdot 0,015[\text{m}]}\right) \cdot 0,015[\text{m}]}{\frac{0,00102[\text{Pa} \cdot \text{s}]}{998[\text{kg} \cdot \text{m}^3]}} \quad (38)$$

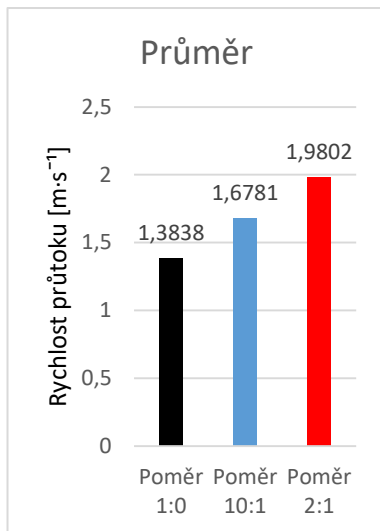
$$Re = \frac{1,57[m \cdot s^{-1}] \cdot 0,015[m]}{\frac{0,00102[Pa \cdot s]}{998 [kg \cdot m^3]}} = 23502,9$$

Díky rovnici číslo 38 bylo možné určit, že v případě průtoku vody o velikosti $1m^3 \cdot h^{-1}$ se jednalo o nejpřesnější možné měření za pomoci vírového průtokoměru. A proto maximální chyba měření bude menší než $\pm 0,75\%$

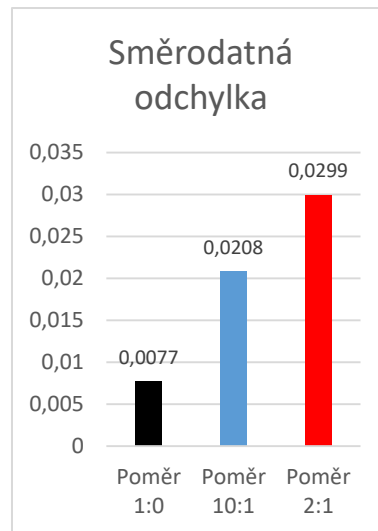


Obrázek 33: Graf rychlosti průtoku v průběhu měření vírového průtokoměru pro objemový průtok vody $1 m^3 \cdot h^{-1}$

Při porovnání hodnot z grafu je možné vidět, že v případě čisté kapaliny byla hodnota měření nižší než hodnota z Coriolisova přístroje. S ohledem na tuto skutečnost, už předem může být stanoveno, že přesnost Vírového průtokoměru i s ohledem na vzduchovou složku bude značně snížena.



Obrázek 34: Průměrná rychlost proudění v průběhu měření pro vírový průtokoměr



Obrázek 35: Směrodatná odchylka z celého měření

Budou-li však porovnány pouze průměrné hodnoty rychlostí průtoku, musí být konstatováno, že obsah vzduchu neovlivňuje přesnost měření jako u ostatních přístrojů. Rychlost proudění byla sice zvýšena, jak bylo předpokládáno, avšak velikost odchylek není nikterak drastická.

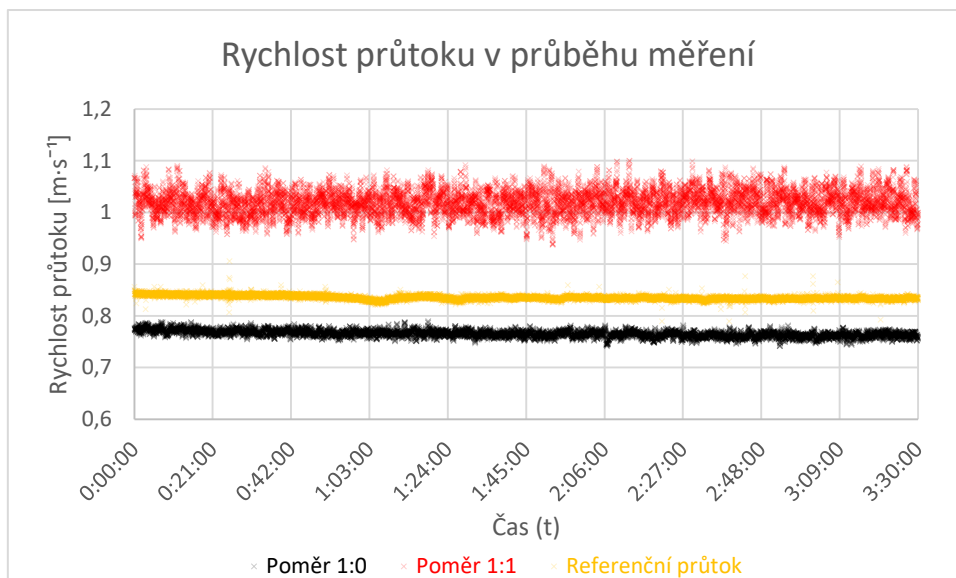
8.4.2. Orientační objemový průtok vody $0,54 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

V případě průtoku vody o velikosti $0,54 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ je nutné říci, že přesnost měření bude snížena, jelikož nebyla dodržena podmínka $Re > 20000$. Tuto skutečnost zobrazuje následující rovnice.

$$Re = \frac{vDN}{\nu} = \frac{\left(\frac{Q_V}{S}\right) \cdot DN}{\nu} = \frac{\left(\frac{0,54[\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}]}{3,14 \cdot 0,015[\text{m}]}\right) \cdot 0,015[\text{m}]}{\frac{0,00102[\text{Pa} \cdot \text{s}]}{998 [\text{kg} \cdot \text{m}^3]}} \quad (39)$$

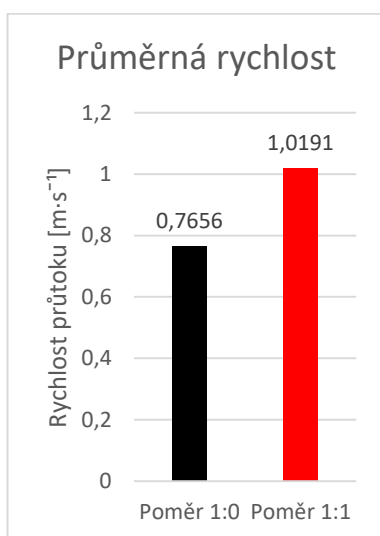
$$Re = \frac{0,85[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \cdot 0,015[\text{m}]}{0,00102[\text{Pa} \cdot \text{s}]} = 12724,5$$

Z tohoto důvodu je nutné říci, že bylo sice možné provádět měření, jelikož hodnota $Re > 5000$ avšak velikost chyby měření bude $> 10\%$

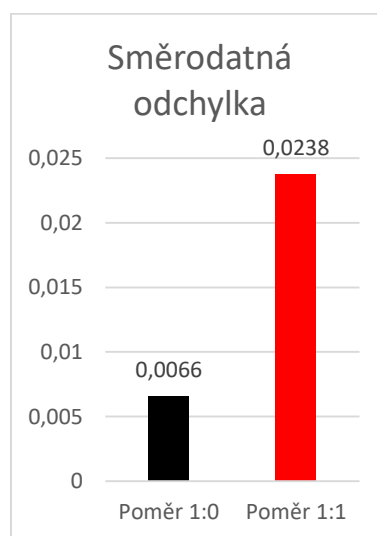


Obrázek 36: Graf rychlosti průtoku v průběhu měření vírového průtokoměru pro objemový průtok vody $0,54 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

I přes sníženou přesnost měření je možné vidět, že hodnota rychlosti bez vzduchu je blíže opravdové hodnotě, než v případě většího objemového průtoku. To může být odůvodněno více způsoby. První možností je, že díky nižší přesnosti měření byla hodnota špatně odměřena, a proto je výsledná hodnota blíže skutečné. Pravděpodobnější interpretací by však mohlo být, že v případě snížení průtoku na polovinu předchozího, bylo i výsledné odchýlení od původní hodnoty poloviční.



Obrázek 37: Průměrná rychlost proudění v průběhu měření pro vírový průtokoměr



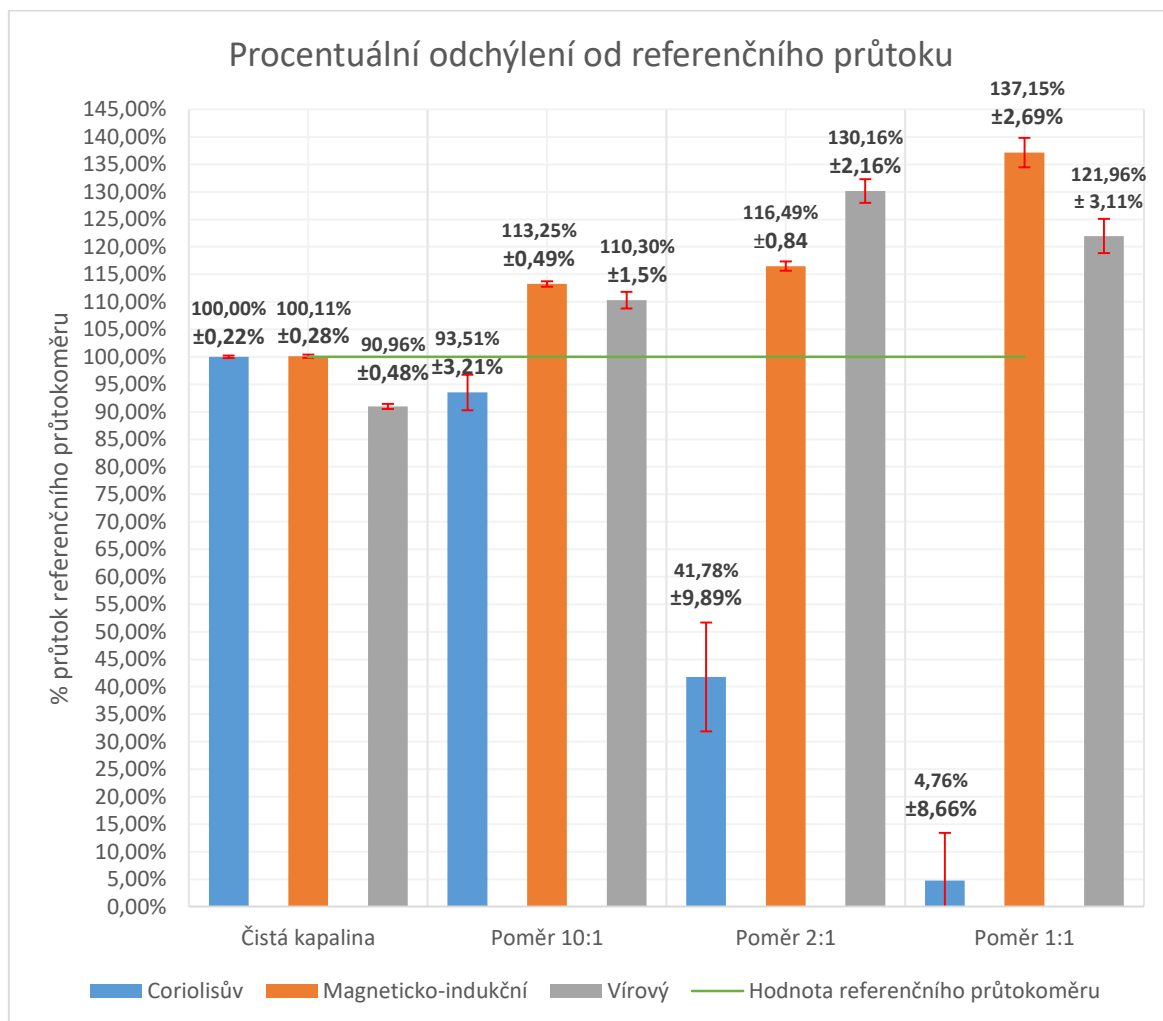
Obrázek 38: Směrodatná odchylka z celého měření pro vírový průtokoměr

V případě obvyklého porovnání je možné vidět, že rozdíl mezi průměrnou rychlostí průtoků, byl nižší než v případě poměru 2:1 u vyšší rychlosti. Nabízí se možnost, že případné měření opravdu nebylo tak přesné kvůli nízkému Reynoldsovu číslu. Jak již bylo řečeno, pravděpodobnějším důvodem je, že se snížením rychlosti proudění se i rozdíl úměrně snižuje.

8.5. Celkové porovnání přesnosti a návrhy na zlepšení

Vzhledem k zadání bylo nutné určit chování jednotlivých přístrojů v případě různého složení vícefázové kapaliny. Jelikož již bylo určeno chování pro jednotlivé přístroje s jednotlivými poměry voda-vzduch, chybí pouze celkové porovnání různých měřících principů a určení, který je nejvíce vhodný pro měření vícefázových kapalin, popřípadě navrhnouti série, která by s tímto problémem dokázala pracovat nejlépe. Pro přesnější porovnání byl vytvořen graf, který zobrazuje rozdíl všech průtokoměrů naráz.

Na grafu byly porovnávány hodnoty v případě průtoku kapaliny s různým poměrem vzduchu. Tato hodnota byla poté porovnána s hodnotou z referenčního průtokoměru, načež výsledný průtok je vyjádřen v procentech. V případě podměřování je výsledná procentuální hodnota snížena, v opačném případě zvýšena. Na grafu byly také znázorněny směrodatné odchylky taktéž v procentech.



Obrázek 39: Procentuální změna rychlosti průtoku

Jak je možné z grafů určit, v případě nízkého poměru voda-vzduch dosáhl nejlepších výsledků, v ohledu na rychlost proudění, Coriolisův průtokoměr a to díky nejmenšímu odchýlení od hodnoty referenčního průtokoměru. To může být dáno skutečností, že v případě nízkého poměru nedochází v testovacím potrubí k převládání žádného z efektu a díky tomu nedocházelo ke změnám amplitudy. Případné bubliny nebyly příliš velké a díky rychlosti proudění mohlo dojít k jejich částečnému stlačení, které dovolovalo lepší pohyb v kapalině, a ten byl částečně vyrovnán za pomoci rezonančního efektu. Z tohoto důvodu tedy dochází pouze k menšímu podměřování. S ohledem na odchylku měření je

možné vidět, že některé hodnoty byly velice blízko hodnotě čisté kapaliny, zatímco některé se vzdalovaly od skutečnosti více. To může podporovat danou úvahu, jelikož v případě bublin v celém rozsahu měřené kapaliny by mělo docházet k převládání bublinkového efektu, avšak díky rezonančnímu efektu tyto malé bubliny mohly být stlačeny, a proto byla pouze malá odchylka od původní hodnoty. Se zvyšující se vzduchovou složkou však docházelo k převládání bublinkového efektu a naměřená hodnota se rapidně snižovala. Tento problém je daný hlavně z důvodu volných bublin v kapalině. Tyto bubliny, ve většině případů díky své velikosti, měly tendenci separovat se od fáze průtoku okolní kapaliny a tím působily záporné chyby. Z tohoto důvodu také docházelo ke zvýšení směrodatné odchylky. Tato odchylka nejspíše vznikala, jelikož v případě většího poměru docházelo ke tvorbě vzduchových kapes v proudící kapalině. Tyto kapsy jsou již příliš velké, aby byly stlačeny, díky čemuž by došlo k vyrovnání průtoku za pomoci rezonance. To zapříčinilo, že v případě měření části se vzduchovou kapsou docházelo k rapidnímu snížení měřené hodnoty, zatímco v případě čisté kapaliny nebo kapaliny s malým obsahem vzduchu byla hodnota mnohem vyšší. U vysokého poměru vzduchu je rozdíl od původní hodnoty obrovský. Vznik této chyby byl dán tím, že u takto vysokého poměru docházelo převážně již k rozvrstvenému toku. Tento tok se projevuje tak, že potrubí je rovnoměrně rozděleno mezi vodu a vzduch a ty proudí nezávisle na sobě. Tím dochází v případě měření téměř k permanentnímu bublinkovému efektu, proto byla mnohokrát na displeji průtokoměru zobrazena záporná hodnota. Jelikož však přenos hodnot za pomoci proudu nebyl nastaven, aby mohl zobrazovat záporné hodnoty, byly tyto hodnoty v případě záznamu zapsány jako nulové. Díky časté nulové hodnotě byla také směrodatná odchylka menší než s nižším objemem vzduchu.

Kdyby byla podmínka testování dána určením objemového průtoku, nejlépe by z testování, ač se tak na první pohled nemusí zdát, vyšel právě Coriolisův průtokoměr. Jeho rychlost průtoku se sice s přidáním vzduchu snižuje, avšak snižuje se přesně v poměru přidaného vzduchu. Celková naměřená hodnota hmotnostního průtokoměru a také rychlosti se snižuje lineárně o tolik, kolik bylo do potrubí přidáno vzduchu. Z tohoto důvodu pokud budou prozkoumána data a objemový průtok by byl vypočten ze vztahu $Q_V = \frac{(Q_{m-čistá} + Q_{m-bubliny})}{1000}$, je možné určit přesný objemový průtok. Tento výpočet by také mohl být využit v případě, že by bylo potřeba určit celkové množství vzduchu v potrubí, pokud nedošlo k jeho přechozímu měření. Celkově však tato skutečnost jde použít pouze v laboratorních podmínkách, neboť v případě přidávání bublin do potrubí za pomoci čerpadla, je zajištěno převládání bublinkového efektu. Zlepšení přesnosti s ohledem na rychlost proudění by bylo docíleno tak, že by v testovacím potrubí došlo ke zvýšení tlaku. Tím by bylo zamezeno převládání bublinkového efektu a mohlo by dojít k jeho vyrovnání s efektem rezonančním. V případě, že by byly oba efekty v rovnováze, docházelo by k přesnému určení rychlosti průtoku.

V případě celkového srovnání je nutné říci, že přístroje se v případě měření rychlosti velice odlišovaly. Celková práce byla založena na testování rychlosti průtoku a v tomto ohledu vyšel nejlépe magneticko-indukční průtokoměr. U měření magneticko-indukčního průtokoměru napomohlo přesnosti, že se jednalo o přístroj s nižším vnitřním průměrem, který způsobil vyšší rychlost průtoku a to beze změny samotného objemového průtoku. Hlavní problém magneticko-indukčního průtokoměru plyne již z jeho způsobu měření, jelikož přístroj nerozliší průtok čisté kapaliny a bublin rozptýlených uvnitř. Bubliny způsobují v případě měření kladnou chybu z důvodu jejich zaměňování za proudící kapalinu. S nižším obsahem vzduchu v potrubí dochází díky větší rychlosti k rovnoměrnému rozprostření bublin v kapalině. Z tohoto důvodu dochází pouze k malému odchýlení od původní hodnoty rychlosti průtoku, kdy tato odchylka byla téměř v poměru měřených složek. Důležitým poznatkem také je, že na rozdíl od Coriolisova průtokoměru u magneticko-indukčního nedocházelo k takovému rozptýlení měřených hodnot, a proto byla i velikost směrodatné odchylky

téměř minimální. V případě zvýšení vzduchové příměsi docházelo, z důvodu vysokého tlaku v potrubí, k oscilacím na rotametru. Z tohoto důvodu musel být průtok vzduchu vypočten z průměrné hodnoty, na které se rotometr nejčastěji ustálil. To mělo nejspíše vliv na menší zvýšení rychlosti průtoku, než by měl správně být. Dále díky těmto oscilacím došlo ke zvýšení směrodatné odchylky a to zejména z důvodu, že docházelo k upouštění vzduchu po dávkách. Tyto dávky tvořily v kapalině větší bubliny, které nebylo možné rovnoměrně rozptýlit v kapalině. Proto byla hodnota rozdílná v případech, kdy docházelo k měření s velkými bublinami, nebo rovnoměrně rozprostřenými. V případě nejvyššího poměru je rozdíl rychlosti již o něco větší, ale stále se jedná o přesnější měření rychlosti než v případě Coriolisova průtokoměru. Zvýšená rychlost byla způsobena tvořením kapes v kapalině. Tyto kapsy v případě měření způsobovaly zvýšení naměřené hodnoty, a proto byla zvýšena i směrodatná odchylka celého naměřeného souboru.

Objemový průtok však tento přístroj dokázal určovat správně pouze v případě, že se jedná o malý poměr vody a vzduchu. Se zvyšujícím se poměrem vzduchu již nerostl objemový průtok lineárně. Zlepšení metody v případě určování rychlosti proudění může být docíleno otočením průtokoměru do vertikální polohy, tím by došlo ještě k lepšímu rozmístění bublin v kapalině. Je nutné však podotknout, že v případě přístroje o větším průměru by byly výsledky velice odlišné.

Vírový průtokoměr se již od začátku potýkal s problémem podměrování, který jej provázel po celou dobu měření. Z tohoto důvodu byly naměřené hodnoty všech průtoků asi o 10% nižší než by měly být. Příčinou bylo nejspíše, jak již bylo zmíněno dříve, že se hodnoty pohybovaly spíše na spodní hranici měřicího rozsahu průtokoměru. Vliv bublin v případě vírového průtoku zapříčiňuje kladnou chybu na změřené rychlosti. To je nejspíše dáno z důvodu toho, že bubliny rozmístěné v kapalině způsobují vibrace na měřícím pádlo, které může považovat tyto vibrace za vír, a proto určuje zvýšenou rychlost průtoku. V případě nízkého poměru dochází k rovnoměrnému rozprostření bublin, a proto je rozdíl od referenční hodnoty lineární s hodnotou poměru složek. Směrodatná odchylka z měření ukazuje, že hodnoty byly víceméně konstantní i přes vzduchové bubliny. Se zvyšujícím se poměrem docházelo i ke zvýšení rychlosti průtoku, avšak toto zvyšování již nebylo v poměru složek. Zvýšený objem vzduchu totiž tvořil v kapalině větší bubliny až kapsy, a proto měřící pádlo nebylo tak často vychýleno těmito bublinami. Zajímavý případ nastal v případě měření s maximálním poměrem. V případě tohoto poměru došlo ke snížení procentuálního vzrůstu oproti předchozím případům. Důvodem by nejspíše mohlo být to, že se v kapalině vytvářely již bubliny ve formě velkých kapes až rozvrstveného toku, proto nebylo pádlo tak často ovlivněno, díky čemuž docházelo k menšímu ovlivnění rychlosti průtoku. Tuto domněnku také podporuje pohled na směrodatnou odchylku měření. Ta je vyšší než v předchozích případech a to z důvodu toho, že docházelo k častému rozdílu v případě měření kapes a čistější kapaliny.

Objemový průtok nebyl určován v žádném z případů správně, zejména z důvodu konstantního podměrování. Kdyby však k výsledné hodnotě bylo připočteno daných 10%, o které přístroj měřil špatně, hodnota by v případě malých poměrů téměř odpovídala celkovému objemovému průtoku. Výsledné zlepšení by mohlo být docíleno několika způsoby. Prvním je testování v případě vyšších rychlostí průtoku, díky němuž by nedocházelo k podměrování. Druhým způsobem je otočení průtokoměru tak, aby měřící pádlo bylo na spodu měřící trubice. Díky tomu by docházelo převážně k měření kapaliny bez bublin.

9. Plány pro budoucí práci

9.1. Vytvoření počítačové aplikace

Vytvoření počítačové aplikace pro budoucí práci je jedním z hlavních cílů. Tato aplikace by měla pracovat za pomoci A/D převodníku dostupného z katedry měření, které bude nastaveno, aby přijatý signál v podobě proudu převáděl na objemový/hmotnostní průtok, popřípadě přímo na vypočtenou rychlost průtoku. Následně aplikace již sama bude zobrazovat graf rychlosti a vypočítávat průměrnou rychlost průtoku a směrodatnou odchylku. Aplikace by také měla být schopná ukládání naměřených dat do programu Excel nebo Matlab.

9.2. Vertikální testování

Testování, v případě umístění průtokoměru do vertikální polohy, by mělo přinášet přesnější výsledky v případě směsi voda-vzduch, díky lepšímu rozmístění bublin v proudící kapalině. Upravením modelu, aby mohlo následné testování probíhat, by mohlo být docíleno přesnějších výsledků, a díky tomu by došlo k lepšímu porozumění dané problematice.

9.3. Testování hypotéz na zlepšení měření

Po analýze dat byly navrženy metody na zlepšení přesnosti měření. V případě magneticko-indukčního se jedná o snížení chyby s postavením přístroje do vertikální polohy. U Coriolisova se jedná o zvýšení pracovního tlaku. Zatímco vírový by měl být otočen, aby měřící pádlo bylo na spodu trubice. V budoucí práci bych velice rád otestoval tyto hypotézy, zda jsou pravdivé a mohly by být využívány v praxi.

9.4. Testování dalších látek

Jelikož fyzikální vlastnosti každé látky jsou rozdílné, dá se předpokládat, že v případě jejich směsí by bylo docíleno jiných výsledků. V případě přestavení modelu by mohlo být docíleno také testování korozivních kapalin a jiných plynů nežli jen vzduchu. V případě modelu v nynější podobě je dalším cílem otestování různých pevných látek v kombinaci s vodou, jako je například písek.

10. Závěr

Tato práce se zabývala porovnáním chování průtokoměrů v rámci vícefázových směsí o různém složení na modelu, který byl navržen pro toto testování. Z důvodu časové náročnosti měření, bylo stanoveno, že hlavní testovací směs bude složena z kombinace kapaliny a plynu, v případě bakalářské práce byla tedy využita voda, do které byl následně přidán vzduch, který vytvořil v proudící vodě bubliny.

Do testování byly na základě skutečnosti testování vícefázového průtoku vybrány čtyři průtokoměry. Hlavními podmínkami ovlivňující výběr byly vnitřní průměr přístroje, jeho použitelnost se znečištěnými kapalinami, rozsah průtoků a hlavně jeho dostupnost k zapůjčení. Z výsledného prozkoumání vlastností byly k testování vhodné čtyři přístroje. Coriolisův průtokoměr s přímou trubicí, vírový průtokoměr, ultrazvukový průtokoměr na principu průchodu doby signálu a magneticko-indukční průtokoměr.

Model byl dle zadání sestaven tak, aby jej bylo možné využít ve výuce. Z tohoto důvodu byl složen převážně sestaven z lehkých a kompaktních materiálů, které bylo možné složit v laboratorních prostorách a v případě potřeby opět rozložit a přenést. Určení příměsí vzduchu bylo zajištěno za pomoci rotametru, který mechanicky měřil objemový průtok vzduchu vháněného do potrubí. Záznam naměřených dat byl vyroben za pomoci ultrazvukového převodníku. Tento převodník zaznamenával, jak data z ultrazvukového průtokoměru, tak i z ostatních elektrických přístrojů v podobě proudu, který převáděl na digitální signál a ten přes USB sběrnici ukládal do tabulek.

Ultrazvukový průtokoměr již v případě nízkého obsahu vzduchu v potrubí vykazoval problémy v případě měření vícefázové směsi. Bubliny rozptýlené v potrubí oslabovaly ultrazvukový signál a tím byl zamezen měřicí princip přístroje. Využití bylo tedy omezeno na referenční průtokoměr, který zajišťoval stejný objemový průtok pro všechny ostatní přístroje.

Magneticko-indukční průtokoměr byl díky vysoké rychlosti průtoku velice přesný v celkovém měření. Větší rychlost průtoku dovozovala ve směsi pouze menší bubliny a ty se držely spíše ve středu proudící kapaliny. Na základě této rychlosti však byl v kapalině zvýšen tlak a z tohoto důvodu došlo k problémům v případě většího objemu vzduchu. Tento problém se projevil sníženou přesností rotametru z důvodu oscilací, které nejspíše ovlivnily některá měření, z důvodu špatného určení objemového průtoku vzduchu. V případě testování kapes výsledky ukázaly menší ovlivnění díky zmíněné větší rychlosti průtoku, která nedovolovala těmto kapsám delší setrvání na měřících čidlech, čímž by docházelo k větším chybám. S ohledem na všechny směrodatné odchylky se jednalo o nejvíce stabilní měření ze všech. Jisté však je, že v případě snížení rychlosti průtoku, by byly výsledky diametrálně odlišné.

V případě vírového průtokoměru dopadlo celkové testování velice špatně. Nízká rychlost průtoku nejspíše ovlivnila měření a hodnoty byly konstantně nižší než na referenčním přístroji. Testování s příměsí vzduchu ukázalo vyšší ovlivnění vzduchovou složkou než v případě magneticko-indukčního. Bubliny v kapalině nejspíše pohybovaly měřícím pádlem a to si milně myslelo, že se jedná o víry vzniklé na překážce. To způsobovalo kladnou chybu, jelikož si pádlo myslelo, že víry vznikají s odlišnou frekvencí. Samotný tvar bublin a rychlost proudění měly velký vliv na tuto frekvenci, menší bubliny pohybovaly častěji pádlem z důvodu většího počtu, zatímco větší s ním pohybovaly méně, jelikož jich bylo v kapalině rozmístěno menší množství. Samotný měřicí princip tedy nebyl na rozdíl od ostatních ovlivněn lineárně s ohledem na poměr vzduchu v kapalině, ale v určité chvíli došlo ke snižování naměřené hodnoty. Výhodou této metody je však stabilita měření reprezentována nízkou směrodatnou odchylkou, to je dáno zejména konstrukcí průtokoměru, který dovoluje testování jak kapalin, tak plynů.

U Coriolisova průtokoměru měla plynná složka možnost dvou efektů. Prvním efektem byl tzv. „bublinový efekt“ snižující naměřenou hodnotu z důvodu toho, že bubliny v případě oscilace nesledují pohyb kapaliny. Druhým efektem byl „rezonanční efekt“, který způsobuje zvýšení naměřené hodnoty z důvodu změny frekvence, která je blíže rezonanci potrubí. V případě laboratorních měření, bude vždy docházet k převládání bublinového efektu. S nízkým obsahem vzduchu však ještě docházelo k projevům rezonančního, a proto nebyl přístroj tak ovlivněn. Se zvyšující se plynnou složkou však docházelo k převažování bublinového efektu, který snižuje naměřenou hodnotu až do záporných čísel, což způsobuje velkou nehomogenitu kapaliny a proto dochází k extrémnímu zvyšování směrodatné odchylky oproti ostatním principům. Tato skutečnost se projevuje nejvíce v případě velkých kapes, kdy část naměřených hodnot byla záporných, avšak kvůli nastavení přístroje byly tyto hodnoty zaznamenány jako nulový průtok, čímž se snížila i velikost směrodatné odchylky.

S ohledem na vytvoření modelu, který kompletně splňuje podmínky zadání a naměřená data, z nichž bylo i přes některé komplikace určeno chování, je možné říci, že všechny cíle práce byly splněny.

Práci na modelu neplánuji s odevzdáním bakalářské práce ukončit, ale chtěl bych pokračovat v případné diplomové práci s testováním dalších směsí, na které nezbyl z důvodu časové náročnosti měření čas. Dále bych chtěl ověřit své hypotézy na zvýšení přesnosti. A nakonec bych chtěl model vylepšit, aby jeho využití ve výuce mohlo být ještě větší, zejména vytvořením počítačové aplikace, která by všechny úkony prováděla již samostatně a to pro všechny přístroje naráz.

11. Zdroje

- [1] Ďaďo S., Bejček L., Platil A., : Měření průtoku a výšky hladiny, BEN-technická literatura, Praha 2005, 1.vydání, ISBN: 80-7300-156-X (Ďaďo S., 2005)
- [2] 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
- [3] Altendorf M., Cossy A., Staudt W. a další , Flow Handbook, Endress+Hauser Flowtec AG, 4153 Reinach/BL Švýcarsko 2006, 3.vydání, ISBN: 3-9520220-4-7
- [4] Bednařík M., Fyzika 1, nakladatelství ČVUT, Praha 2011, ISBN: 978-80-0104-834-4
- [5] Technical Information Proline Prowirl F 200, TI01084D/06/EN/05.15 71299457, dostupné z URL: https://portal.endress.com/wa001/dla/5000664/1982/000/04/TI01084DEN_0515.pdf
- [7] Technical Information Proline Promag 50H, 53H, TI00048D/06/EN/14.16 71318126, dostupné z URL: https://portal.endress.com/wa001/dla/5000319/0453/000/07/TI00048DEN_1416.pdf
- [8] Technical Information Proline Promass 80/83 H, I, TI052D/06/en/11.05 71008418, dostupné z URL: <https://portal.endress.com/wa001/dla/5000000/0162/000/02/TI052DEN.pdf>
- [9] Technical Information Proline Prosonic Flow 93P, TI00083D/06/EN/13.11 71136721, dostupné z URL: https://portal.endress.com/wa001/dla/5000254/2996/000/02/TI00083DEN_1311.pdf
- [10] Ing. Soňa Orlíková, Měření průtoku tekutin - principy průtokoměrů, dostupné z URL: http://www.elektrorevue.cz/clanky/01049/index.html#_Úvod
- [11] prof. Ing. Milan Pavelek, CSc. ,přednáškový materiál: TERMOMECHANIKA 17. Přenos tepla konvekcí , FSI VUT v Brně, Energetický ústav Odbor termomechaniky a techniky prostředí , dostupné z URL: http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/termo/17_Konvekce.pdf
- [12] Marcus Herrmann, přednáškový materiál: Two-Phase Flow tutorial, Stanford University, Center for Turbulence Research, dostupné z URL: <https://web.stanford.edu/group/ctr/SummerProgram/TwoPhaseTutorial.pdf>
- [13] Pavel Burget, Profibus-PA-řešení pro automatizaci procesů, dostupné z URL: http://automa.cz/cz/casopis-clanky/profibus-pa-reseni-pro-automatizaci-procesu-2001_01_33429_1592/
- [14] Zhu H., Rieder A., Lin Y., An Innovative Technology for Coriolis Metering under Entrained Gas Condition, dostupné ke stažení z URL: 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_QQFgggMAE&url=http%3A%2F%2Fmetrology.asn.au%2Fflomeko2016%2Fpapers%2F57b176fe560bd-Flomeko2016-Coriolis-EntrainedGas-Zhu.docx&usg=AFQjCNHBuAoeOtS4CZdswkj1xYupWDsYRw&sig2=Nb4cKe12o7JxJzufzCYf-g

Seznam příloh

- 1) Originál 3D modelu ve formátu.123dx
- 2) Video oscilací rotometru
- 3) Naměřená data Coriolisův průtokoměr objemový průtok $1 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ poměr 1:0
- 4) Naměřená data Coriolisův průtokoměr objemový průtok $1 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ poměr 10:1
- 5) Naměřená data Coriolisův průtokoměr objemový průtok $1 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ poměr 2:1
- 6) Naměřená data Coriolisův průtokoměr objemový průtok $0,54 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ poměr 1:0
- 7) Naměřená data Coriolisův průtokoměr objemový průtok $0,54 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ poměr 1:1
- 8) Naměřená data Magneticko-indukční průtokoměr objemový průtok $1 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ poměr 1:0
- 9) Naměřená data Magneticko-indukční průtokoměr objemový průtok $1 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ poměr 10:1
- 10) Naměřená data Magneticko-indukční průtokoměr objemový průtok $1 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ poměr 2:1
- 11) Naměřená data Magneticko-indukční průtokoměr objemový průtok $0,54 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ poměr 1:0
- 12) Naměřená data Magneticko-indukční průtokoměr objemový průtok $0,54 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ poměr 1:1
- 13) Naměřená data Vírový průtokoměr objemový průtok $1 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ poměr 1:0
- 14) Naměřená data Vírový průtokoměr objemový průtok $1 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ poměr 10:1
- 15) Naměřená data Vírový průtokoměr objemový průtok $1 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ poměr 2:1
- 16) Naměřená data Vírový průtokoměr průtok $0,54 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ poměr 1:0
- 17) Naměřená data Vírový průtokoměr průtok $0,54 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ poměr 1:1