

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Měření hydraulických parametrů kavitační oblasti při  
sycení vzduchem

Measurement of Hydraulic Parameters of the Cavitation  
Area at Air Saturation

Student: Filip Špička

Vedoucí diplomové práce: prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.

Ostrava 2015

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

## Zadání bakalářské práce

Student: **Filip Špička**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení  
Téma: **Měření hydraulických parametrů kavitační oblasti při sycení vzduchem**  
**Measurement of Hydraulic Parameters of the Cavitation Area at Air Saturation**

Zásady pro vypracování:

1. Teorie kavitace v kapalině, obsahu rozpuštěného a nerozpuštěného vzduchu v kapalině, rychlosti uvolňování.
2. Přehled měřidel tlaku, průtoku a obsahu vzduchu.
3. Metody vizualizace kavitace.
4. Popis zařízení pro generování kavitace a sycení vzduchem.
5. Měření hydraulických veličin v obvodu, měření oblasti kavitace.
6. Grafické zpracování výsledků a porovnání výsledků s literaturou.

Seznam doporučené odborné literatury:

DRÁBKOVÁ, S. a kol. *Mechanika tekutin*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. 248 s. (Elearningová učebnice). ISBN 978-80-248-1508-4.  
BOJKO, M. a kol. *Základy hydromechaniky a zásobování hasiv*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava 2007. 182 s., ISBN 80-86634-53-1.  
MILLER, D. *Internal Flow System*, BHRA UK, 396 s., ISBN 0-947711-77-5.  
KOZUBKOVÁ, M. a kol. *Mechanika tekutin, návody pro laboratorní cvičení*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. 113 s. (Elektronická publikace na CD ROM).  
NOSKIEVIČ, J. *Kavitace*. Praha: AKADEMIA, 1969. 278 s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.**

Datum zadání: 13.12.2014  
Datum odevzdání: 18.05.2015



doc. Dr. Ing. Lumír Hružík  
vedoucí katedry

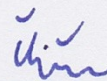


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou (bakalářskou) práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové (bakalářské) práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....  
18. 5. 2015



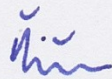
.....  
podpis studenta



Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na mou diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 18.5.2015

  
.....podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Filip Špička

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Hrnčířská 351/15  
Opava, 746 01

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

ŠPIČKA, F. *Měření hydraulických parametrů kavitační oblasti při sycení vzduchem*: bakalářská práce. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2015, 43 s. Vedoucí práce: Kozubková, M.

Bakalářská práce se zabývá experimentálním zařízením pro vizualizaci kavitace a vlivem sycení vzduchem na průběh kavitačního děje. V úvodu je popsána teorie kavitačního jevu a následky na materiál a celé zařízení. Následně jsou popsány měřidla vhodná pro měření hydraulických veličin v obvodu a metody vizualizace kavitačního jevu. Dále se práce zabývá experimentálním zařízením pro generování kavitace. V poslední části jsou uvedeny naměřené a vypočtené hodnoty a grafické vyhodnocení snímků kavitační oblasti. V závěru je měření zhodnoceno a navržen postup dalšího experimentálního zkoumání.

## **ANNOTATION OF BACHELOR THESIS**

ŠPIČKA, F. *Measurement of Hydraulic Parameters of the Cavitation Area at Air Saturation*: bachelor thesis. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydrodynamics and Hydraulic Equipment, 2015, 43 s. Head of bachelor Thesis: Kozubková, M.

Bachelor thesis is dealing with experimental mechanism for the visualization of cavitation and air saturation effect on the process cavitation. The introduction describes the theory of cavitation and its aftermath on the material and whole equipment. Then gauges are described for measurement hydraulic parameters of the hydraulic circuit and visualization methods cavitation. Next part bachelor thesis is dealing with experimental equipment for creating cavitation. The last section shows the measured and calculated values and graphical evaluating images cavitation field. At the end of the measurement is evaluated and suggests the next experimental investigation.

## Obsah

1.	Úvod .....	9
2.	Teorie kavitace v kapalině, obsahu rozpuštěného a nerozpuštěného vzduchu v kapalině.....	10
2.1	Kavitace.....	10
2.2	Koncentrace rozpuštěného plynu ve vodě.....	11
3.	Přehled měřidel tlaku, průtoku a obsahu vzduchu.....	12
3.1	Měřidla tlaku .....	12
3.2	Průtokoměry .....	13
3.3	Měřidlo pro měření obsahu kyslíku rozpuštěného ve vodě.....	14
4.	Metody detekce kavitace .....	16
4.1	Měření rychlokamerou .....	16
4.2	Měření hluku .....	17
4.3	Měření vibrací .....	17
4.4	CFD modelování kavitace .....	17
5.	Popis zařízení pro generování kavitace a sycení vzduchem.....	18
5.1	Popis schéma .....	18
5.2	Prvky zařízení.....	19
5.2.1	Kruhová Lavalova dýza.....	19
5.2.2	Plochá Lavalova dýza.....	20
5.2.3	Další prvky obvodu .....	21
5.3	Zařízení pro sycení vzduchem.....	23
6.	Měření hydraulických veličin v obvodu, měření oblasti kavitace.....	24
6.1	Postup měření.....	24
6.2	Výsledky měření.....	24
6.3	Vyhodnocení měření .....	26
6.4	Zpracování videozáznamů.....	30
7.	Grafické zpracování výsledků a porovnání .....	35
8.	Závěr.....	40
9.	Seznam použité literatury .....	41
10.	Seznam příloh .....	42

## Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Název	Jednotka
$\alpha$	Objemový zlomek	[-]
$\rho_{H_2O}$	Hustota vody	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\rho_{vz}$	Hustota vzduchu	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\Delta p$	Tlakový spád	[Pa]
$C_i$	Koncentrace nasycení vody plynem	[mg.l <sup>-1</sup> ]
$K_i$	Absorpční koeficient	[mg.l <sup>-1</sup> ]
$Q_{V_{H_2O}}$	Objemový průtok vody	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$Q_{m_{H_2O}}$	Hmotnostní průtok vody	[kg.s <sup>-1</sup> ]
$Q_{V_{vz}}$	Objemový průtok vzduchu	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$Q_{m_{vz}}$	Hmotnostní průtok vzduchu	[kg.s <sup>-1</sup> ]
$M$	Molární hmotnost plynu	[kg.mol <sup>-1</sup> ]
$R$	Univerzální plynová konstanta	[J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$T$	Teplota	[K]
$Y$	Hmotnostní zlomek	[-]
$V_{vz}$	Objem vzduchu	[m <sup>3</sup> ]
$V_{H_2O}$	Objem vody	[m <sup>3</sup> ]
$p_i$	Parciální tlak plynu	[-]
$p_a$	Absolutní tlak	[Pa]
$p_{a1}$	Absolutní tlak před dýzou	[Pa]
$p_{a2}$	Absolutní tlak za dýzou	[Pa]
$p_p$	Přetlak (relativní tlak)	[bar]

$p_b$	Atmosférický tlak	[Pa]
$m_{vz}$	Hmotnost vzduchu	[kg]
$m_{H_2O}$	Hmotnost vody	[kg]
$v$	Výška hladiny	[cm]



## 1. Úvod

Kavitace se považuje za nežádoucí jev a v hydraulických systémech je velmi častým problémem. V dnešní době se dostává do popředí teoretického i experimentálního zkoumání. Projevem kavitace bývá hluk, vibrace a nepříznivé opotřebení materiálu. Bylo vydáno mnoho publikací zabývajících se fyzikálními procesy a projevy kavitace.

V této bakalářské práci se budu zabývat zpracováním teorie kavitačního jevu a stanovení měřidel vhodných pro měření hydraulických veličin v obvodu při kavitaci. Dále bude navrženo a sestaveno experimentální zařízení pro vznik a zkoumání kavitace s možností sycení vzduchem a vhodnými hydraulickými a měřicími prvky. Vlastní měření bude probíhat na ploché Lavalově dýze definované postupným zúžením a následným rozšířením průtočného prostoru. Bude provedeno měření kavitačního děje v dýze bez sycení vzduchem a následně i se sycením vzduchem. Experimentální měření bude provedeno pro deset různých hodnot průtoku bez sycení vzduchem a deset hodnot průtoku se sycením vzduchem. Průtok bude měněn pomocí frekvenčního měniče čerpadla. Při jednotlivých měřeních budou měřeny tlaky před a za dýzou, průtok vody, průtok vzduchu, obsah rozpuštěného vzduchu v kapalině a velikost kavitační oblasti. Z každého měření bude proveden videozáznam, který bude upraven a rozdělen na jednotlivé fotografie. Ty budou dále analyzovány a pomocí programu MathWorks - MATLAB bude pro každé měření vyhodnocena střední hodnota kavitační oblasti. Cílem měření je získání okrajových podmínek pro matematickou modelaci kavitačního jevu. V závěru práce bude početní i grafické vyhodnocení průběhu kavitace, návrh dalšího postupu zkoumání kavitačního jevu a porovnání výsledků s literaturou.

## 2. Teorie kavitace v kapalině, obsahu rozpuštěného a nerozpuštěného vzduchu v kapalině

### 2.1 Kavítace

Slovo kavitace pochází z latinského slova *Cavitas* což v překladu znamená dutina. Je to nežádoucí jev charakterizovaný vznikem, vývojem a zánikem (implozí) bublin. V důsledku poklesu tlaku při průtoku zúženými průřezy, vniká dutina, která je naplněna nasycenými párami a později do ní mohou z kapaliny difundovat plyny. Místo se zúženým průřezem bývá také příčinou zvýšení rychlosti. Při zmizení podtlaku vzniklého zúženým průřezem bublina zaniká (imploduje), což je doprovázeno rázovou vlnou a destruktivním účinkem na okolní materiál. Zánik bubliny se projevuje hlukem, vibracemi a má neblahý vliv na kvalitu média a životnost zařízení i jednotlivých prvků. Kavítace je z velké části ovlivněna velikostí podtlaku, vlastnostmi kapalin, soudržností kapaliny, teplotou a také znečištěním. Tuhé částice tvoří kavitační jádra. Kavítace výrazně snižuje životnost hydraulických zařízení. Poškození, projevující se téměř na všech materiálech, se nazývá kavitační eroze. [1,10]



**Obr. 2.1** Poškození lodního šroubu vlivem kavitační eroze [20]

V technické praxi rozlišujeme dva druhy kavitací, vzduchová (plynová) a parní kavitace. Parní kavitace je ovlivněna stavem kapaliny v daném místě. Vzniká při poklesu tlaku pod hodnotu tlaku nasycených par v daném místě při určité teplotě. Dochází k porušení souvislosti kapaliny a vzniká kavitační dutina, ta se poté za stálého nebo nižšího tlaku zvětšuje až do maximální velikosti a po přemístění do oblasti vyššího tlaku dutina zaniká (imploduje). Plynová kavitace je ovlivněna rozpuštěným i nerozpuštěným vzduchem v kapalině a je vyvolána uvolňováním rozpuštěného vzduchu nebo přísávaním vzduchu vlivem netěsností hydraulických prvků. Obsah vzduchu má vliv pouze na plynovou kavitaci. [11]

Nejčastějším místem vzniku kavitace je sací potrubí, dalším možnostmi jsou místa se zúženým průměrem průtoku (dýza), ale může se vyskytnout i ve stojící kapalině, ve které se pohybuje pevné těleso (lodní šroub). [1]

## 2.2 Koncentrace rozpuštěného plynu ve vodě

Koncentrace rozpuštěného plynu ve vodě je přímo úměrná parciálnímu tlaku plynu nad její hladinou. Je definována Henryho zákonem. (2.1) [5]

$$C_i = K_i \cdot p_i \quad (2.1)$$

$C_i$  - Koncentrace nasycení vody plynem, bývá udávána jednotkou [ $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ].

$K_i$  - Absorpční koeficient vyjadřuje rozpustnost plynu v závislosti na teplotě a tlaku. Hodnota je vázána na teplotu, čím je teplota vody vyšší tím méně plynu je schopno rozpustit se v kapalině. Hodnoty absorpčního koeficientu jsou vyjádřeny jednotkou [ $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ] v tabulce (Tabulka 2.1)

$p_i$  - Parciální tlak plynu, je přímo úměrný procentu objemu, v jakém je plyn obsažen ve vzduchu. Parciální tlak je definován jako podíl na celkovém tlaku směsi plynů, který vyvozuje jedna z jeho složek. Součet parciálních tlaků všech složek je pak roven celkovému tlaku směsi. [19]

Plyn	0°C	20°C	50°C
Dusík (N)	29	19	12
Kyslík (O <sub>2</sub> )	69	43	27
Oxid uhličitý (CO <sub>2</sub> )	3343	1687	758

**Tabulka 2.1** Absorpční koeficient  $K_i$  pro dané plyny[13]

Množství vzduchu je závislé na teplotě, ale v rozsahu teplot 20-80°C je téměř konstantní. Při porušení rovnovážného stavu, při kterém došlo k nasycení kapaliny vzduchem, a to v důsledku změny tlaku či teploty kapaliny, dochází k uvolňování molekul vzduchu a ke vzniku bublin, čímž vzniká směs kapaliny se vzduchem, nebo se v kapalině rozpouští další vzduch. [12]

### 3. Přehled měřidel tlaku, průtoku a obsahu vzduchu

#### 3.1 Měřidla tlaku

Měření tlaku je nejčastější úlohou technické diagnostiky v hydraulice. Většinou jde o měření přetlaku, který je dán rozdílem absolutního tlaku (měřeného od absolutní tlakové nuly) a atmosférického tlaku. Dalším případem je měření podtlaku, ten je dán rozdílem atmosférického a absolutního tlaku. [14]

##### Deformační manometry

Nejjednodušší a nejpoužívanější měřidla tlaku jsou deformační manometry. Deformačním členem bývá Bourdonova trubice, membrána nebo vlnovec. Bourdonova trubice je trubice eliptického průřezu stočená do oblouku, nejčastěji vyráběnou z mosazi nebo oceli (pro větší tlaky). Jeden konec trubice je spojen s přívodem tlaku a druhý přes mechanický převod k ukazateli na stupnici. Trubice má tendenci se narovnávat při působení tlaku. Manometry lze měřit přetlak, podtlak i tlakovou diferenci s maximální přesností 1%. [14]

##### Kapalinové tlakoměry

Velmi přesnými měřidly jsou kapalinové tlakoměry. Pracují na principu vyrovnávání měřeného tlaku hydrostatickým tlakem sloupce měrné kapaliny. Pro různý rozsah tlaků se používá měrná kapalina o různé hustotě. V technické praxi se používají různé typy kapalinových tlakoměrů např. U - trubicový, Betzův, prstencový nebo nádobkový. [7]

##### Snímače tlaku

Další skupinou jsou snímače tlaku, ve většině případů jde o tenzometrický senzor. Jedná se o převod tlaku na elektrický signál s proudovým nebo napěťovým výstupem. Měřený tlak působí na membránu, kterou prohýbá a působí tak deformaci tenzometru. Při jeho deformaci vzniká elektrický odpor přímo úměrný měřenému tlaku. K zobrazení hodnoty tlaku měřeného snímači se používají zobrazovače a záznamníky. [14]



Pro měření tlaku našeho experimentálního zařízení byly použity tlakové snímače CRESSTO TMG 567 Z3G a zobrazovač HYDROTECHNIK M5050 s 8 analogovými vstupy a možností záznamu měření.

## 3.2 Průtokoměry

Zařízení sloužící pro měření objemového a hmotnostního průtoku v uzavřeném obvodu nebo na otevřené trati. Nejrozšířenější průtokoměry pracují na objemovém nebo rychlostním principu.

### Objemové průtokoměry

Objemové průtokoměry jsou založeny na několika způsobech měření, lišících se konstrukcí a metodou měření. Každý přístroj, u kterého dochází k otevírání a uzavírání pracovních prostor protékaných kapalinou, může být považován za objemový průtokoměr. Je-li známý pracovní objem za jednu otáčku přístroje. Do této kategorie patří průtokoměry lopatkové, bubnové a průtokoměry s oválnými koly. [14]

### Rychlostní průtokoměry

V této skupině se vyskytují typy využívající silového i tepelného účinku kapaliny a změny odporu proti pohybu. Jejich škála je velmi široká a setkáváme se s nimi nejčastěji. Turbínkové průtokoměry mají měřicí turbínku, která se otáčí vlivem protékání kapaliny s rychlostí závisící na průtoku. Rychlostní sondy jsou vhodné pro větší průměry potrubí. Snímají střední hodnotu celkového tlaku a tlak na úplavové straně. Indukční průtokoměry jsou použitelné pouze pro elektricky vodivé kapaliny a fungují na principu Faradayova zákona elektromagnetické indukce. Ultrazvukové průtokoměry se používají pro měření v agresivních prostředích. [17]

Při měření průtoku kapaliny, v experimentálním zařízení pro generování kavitace, jsme použili indukční průtokoměr firmy ELIS PLZEŇ DN60 PN16 TG ISO 110.

### 3.3 Měřidlo pro měření obsahu kyslíku rozpuštěného ve vodě

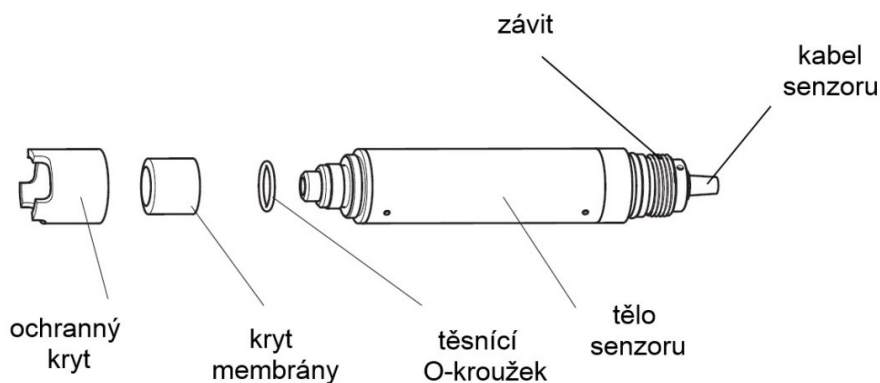
Nejčastější použití měřidla bývá při měření, sledování a regulaci obsahu kyslíku v aktivačních nádržích nebo výpustích čistíren odpadních vod. Dále je používáno pro sledování obohacování pitné vody kyslíkem a sledování obsahu kyslíku ve vodních plochách určených k chovu ryb. V našem případě použijeme měřidlo pro měření obsahu kyslíku rozpuštěného ve vodě a jeho vlivu na kavitaci. [4]

#### Optický senzor Oxymax W COS61

Princip spočívá v tlumení fluorescenční vrstvy umístěné na membráně senzoru. Opticky aktivní (fluorescenční) vrstva obsahuje molekuly citlivé na kyslík. Senzor je z části ponořen do média, rozpuštěný kyslík je pomocí difúze přenesen do krytu membrány, ten je průchozí pouze pro rozpuštěné plyny v médiu, pro ostatní rozpuštěné látky, např. ionty, průchozí není. [2]

Optika senzoru směřuje na spodní stranu fluorescenční vrstvy a vysílá na ni záblesky zeleného světla. Molekuly citlivé na kyslík obsažené ve fluorescenční vrstvě odpovídají záblesky červeného světla. Délka a intenzita červených signálů je přímo úměrná obsahu kyslíku rozpuštěného v médiu a parciálnímu tlaku. Molekuly kyslíku tlumí molekuly obsažené ve fluorescenční vrstvě. Při větším obsahu kyslíku jsou signály tlumenější a kratší, pokud kyslík v médiu není přítomen, signály jsou jasné a dlouhé.

Výsledkem měření je signál, přímo úměrný koncentraci kyslíku v médiu, který vrací senzor. Nutnou podmínkou pro měření není proudění média, avšak při proudění dojde ke zlepšení odezvy měřicího systému a zvýší se rychlost měření. [2]



**Obr. 3.1** Popis senzoru

### Ampérový senzor

Pro měření obsahu vzduchu v kapalině se používají také ampérometrické snímací senzory, které jsou založeny na měření proudu mezi dvěma elektrodami potopenými v roztoku elektrolytu. Hodně rozšířená je Clarkova sonda pro měření obsahu kyslíku, která je sestavena z pracovní a srovnávací elektrody (katoda a anoda). Měřicí převodník nám přivádí na elektrody polarizační napětí. Elektrolyt je tvořen vodným roztokem KCl nebo KBr. Polopropustná membrána uzavírá měřicí sondu a izoluje gelový elektrolyt od měřeného roztoku, ale pro kyslík je propustná. [3]

Jestliže vložíme sondu do měřeného roztoku, molekuly kyslíku obsažené v kapalině difundují membránou, vznikají oxidačně redukční reakce na elektrodách a mezi elektrodami protéká proud. Jeho velikost závisí přímo úměrně na obsahu kyslíku v kapalině. Množství obsaženého vzduchu v kapalině je značně závislé na teplotě, kterou měří sonda termistorem a výsledný signál se využije pro automatickou kompenzaci působení teploty v převodníku. [3]

Měření je časově náročné, protože dochází k pomalému ustálení měřené hodnoty. Také je nutná častá údržba a kalibrace přístroje. Dalším prvkem je částečné spotřebování kyslíku vlivem reakcí v elektrodách a tím i zkreslení výsledných hodnot. Kapalina tedy musí při měření obsahu kyslíku proudit, jinak by se kyslík v oblasti senzoru zcela spotřeboval a měření by nemělo smysl [4].

## 4. Metody detekce kavitace

Vizualizace kavitace je často používanou metodou při experimentálním výzkumu kavitace. Je to dané tím, že kavitační bubliny v kapalině způsobují lom světla, což je dělá dobře viditelnými. Všeobecně jsou práce zaměřené buď na vizualizaci zániku samotné bubliny, nebo na vizualizaci kavitačního mraku. Kavitace přitom může být hydrodynamická, generovaná ultrazvukem, laserem nebo elektrickým výbojem. [6]

### 4.1 Měření rychlokamerou

Rychlokamery se uplatňují v celé řadě technických aplikací. Jejich možnosti však bývají využity teprve při snímání extrémně rychlých a krátkých dějů. Vysokorychlostní kamera je přenosné optoelektrické zařízení, vytvářející obrazový záznam s vysokou frekvencí snímání. V dnešní době jsou vysokorychlostní kamery digitální (vytvářejí digitalizovaný záznam obrazu a zvuku), stejně jako klasické kamery. Vytvářený záznam může být barevný nebo černobílý, v některých případech je černobílý záznam vhodnější s ohledem na objem zpracovávaných a přenášených dat. Rychlokamery bývají bez displeje a téměř bez ovládacích prvků, veškeré nastavení se provádí přes řídicí panely a počítačové systémy. Základními a rozhodujícími parametry jsou rozlišení a frekvence. Tyto parametry jsou na sobě vzájemně závislé. S rostoucí frekvencí snímání klesá rozlišení záznamu. Při vysokých frekvencích snímání dochází ke zpracování obrovského množství dat. Dnes již běžné snímkové frekvence odpovídají 100 000 fps (obrázků za sekundu). Hlavní podmínkou pro použití rychlokamery je dostatečné osvětlení snímaného děje. Digitální záznam je vhodný pro další analýzu s přiřazením reálného času a rozměrů ke každému snímku. Díky velmi malému časovému kroku dokážeme nestacionární kavitační děj pozorovat a analyzovat jeho průběh. [9,15]

Pro vizualizaci kavitace v mém experimentu nebyla použita vysokorychlostní kamera, ale kamera s rychlostí snímání 60 snímků za vteřinu. Ze záznamu jsem vyhodnocoval střední hodnotu velikosti kavitační oblasti.



## 4.2 Měření hluku

Hluk při kavitaci je způsobován vznikem, pulzacemi a především zánikem kavitačních bublin, při kterém se projevuje velký nárůst tlaku a rychlosti kapaliny. V oblasti kavitace je velký počet bublin, jejichž zanikání způsobuje vzájemně se ovlivňující tlakové vlny. Při kavitaci mohou dosahovat velké pulzující bubliny frekvence 10 Hz a malé bubliny až 3 MHz. Toho bývá využíváno v zařízeních bez možnosti vizuálního sledování. V našem případě by měření hluku vlastní kavitace bylo velmi složité z důvodu ovlivnění hluku jinými prvky (hydrogenerátor). [12]

## 4.3 Měření vibrací

Současně s hlukem se v průběhu kavitace vytváří vibrace. Největší vibrace jsou v místě plně vyvinuté kavitace. V případě, že se vibrace samotné kavitace shodují s frekvencí kmitání prvků v obvodu, dochází k rezonanci jednotlivých prvků nebo celého zařízení. Dosažení rezonanční frekvence se projevuje vibracemi. Nejjednodušší formou je realizace širokopásmových měření celkových úrovní vibrací. Snímače vibrací (vibrometry) se dělí podle typu snímané veličiny na snímače výchylky, rychlosti a zrychlení. [10]

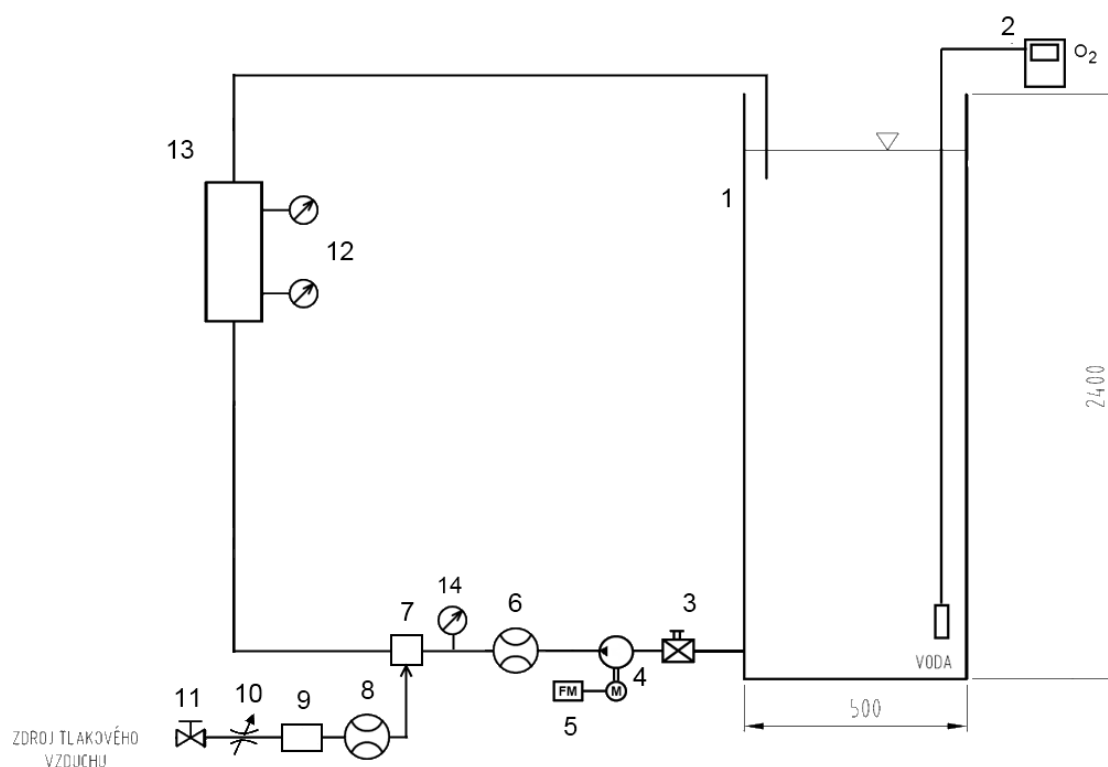
## 4.4 CFD modelování kavitace

Matematické modelování proudění kapaliny bývá řešeno modelováním jednofázového nebo vícefázového proudění. Jednofázové proudění je jednodušší v rychlosti výpočtu, ale udává pouze orientační hodnoty o oblastech kavitace. Pro vícefázové proudění směsi plynu a kapaliny je nutné stanovit okrajové podmínky (obsah rozpuštěného vzduchu), ale dokážeme zkoumat počátek a průběh plynové kavitace. Vícefázové proudění s okrajovými podmínkami se řeší pomocí CFD (Computational Fluid Dynamics). Výsledky získané pomocí CFD simulací jsou výraznou mírou ovlivněné znalostí vstupních dat, kterými jsou hlavně okrajové podmínky a materiálové vlastnosti použitých tekutin. V případě modelování kavitace hraje významnou úlohu znalost obsahu plynů obsažených v kapalině. [6,16]

## 5. Popis zařízení pro generování kavitace a sycení vzduchem

### 5.1 Popis schéma

Na obrázku jsou schématicky zakresleny jednotlivé měřidla a prvky experimentálního zařízení pro generování kavitačního jevu.



**Obr. 5.1** Schéma obvodu pro generování kavitace

**Popis obvodu** - 1 – nádrž, 2 – měřidlo nerozpuštěného vzduchu na vstupu měřidlem ENDRESS + HAUSER - LIQUILINE (typ CM442-10K6/0), 3 – kulový kohout, 4 – hydrogenerátor firmy GRUNDFOS s.r.o. s elektromotorem (typ CR 20-5A-F-A-E HQQE), 5 – frekvenční měnič typ YASKAWA VS mini J7, 6 – indukční průtokoměr firmy ELIS PLZEŇ a.s. (typ DN50 PN16 TG ISO 110), 7 – sycení vzduchem, 8 – vzduchový průtokový snímač firmy SMC (typ PFMV510-1), 9 – jednotka pro úpravu stlačeného vzduchu firmy SMC (typ SAI 2091), 10 – regulační vzduchový škrťací ventil firmy BOSCH, 11 – ventil, 12 – snímače tlaků CRESSTO, 13 – měřený objekt (plochá Lavalova dýza, kruhová Lavalova dýza), 14 - snímač tlaku CRESSTO za čerpadlem

Velikost nádrže je volena tak, aby dno bylo pod úrovní Lavalovy dýzy. Rozměry nádrže jsou zakótovány v obrázku (**Obr. 5.1**). Mezi nádrží a čerpadlem se nachází kulový ventil. Dále je umístěno čerpadlo, indukční průtokoměr měřící průtok za čerpadlem a zařízení pro sycení kapaliny vzduchem.

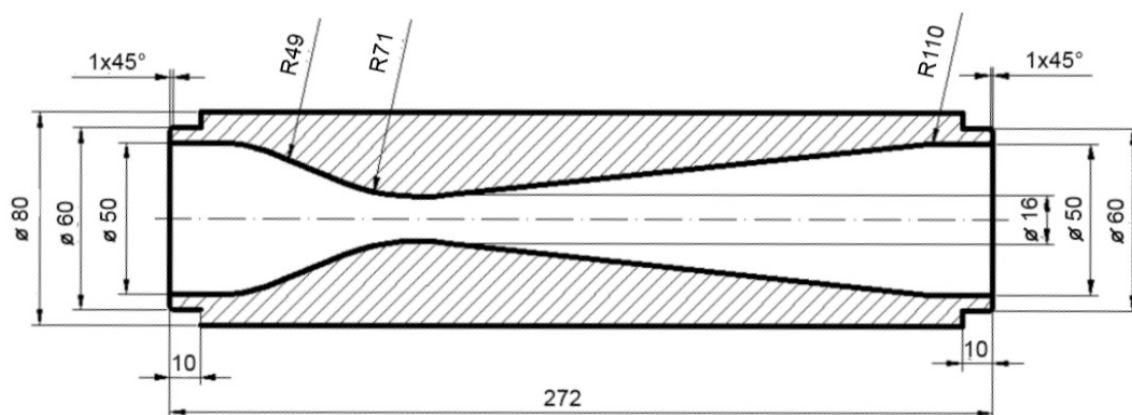
V tomto zařízení je vzduch pod tlakem vháněn do kapaliny, dochází k sycení kapaliny vzduchem a zkoumá se jeho vliv na kavitační jev. Následuje Lavalova dýza sloužící k vytvoření kavitačního jevu a na ní umístěny snímače tlaku. Pracovní kapalinou je voda.

## 5.2 Prvky zařízení

### 5.2.1 Kruhová Lavalova dýza

Kruhová Lavalova dýza je vyrobená firmou Freso, spol. s.r.o., z čirého materiálu Tecanat (amorfní průhledný materiál s výbornou rázovou a mechanickou pevností a schopností provozní teploty až 120°C). Je složená ze tří částí s rozměry volenými s ohledem na výrobu.

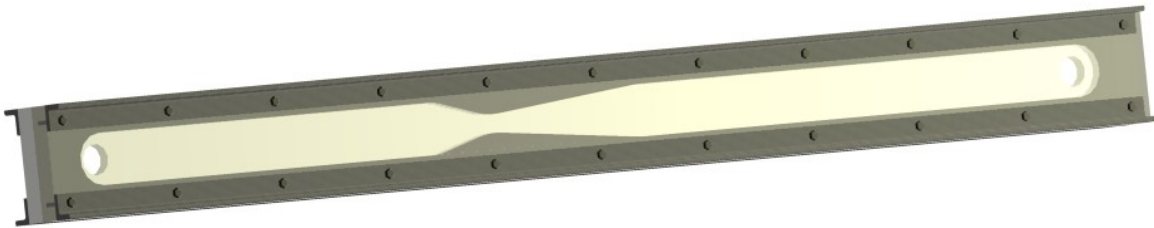
[6]



**Obr. 5.2** Rozměry kruhové Lavalovy dýzy

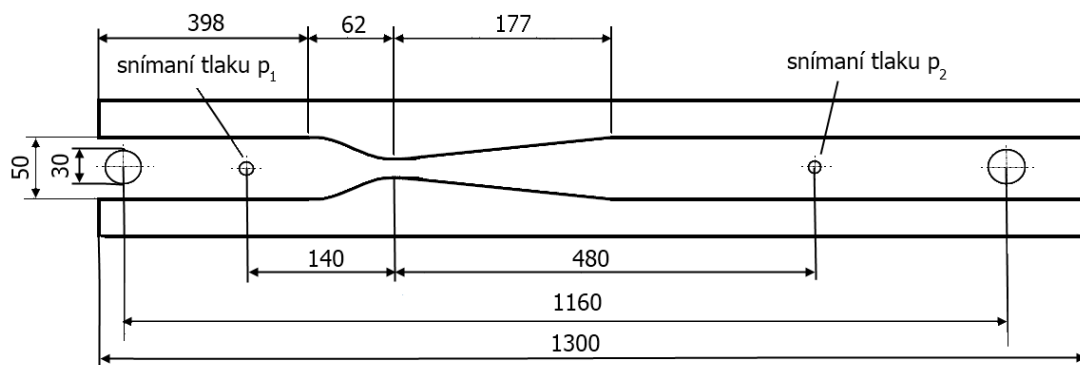
## 5.2.2 Plochá Lavalova dýza

Zařízení sloužící k vytvoření kavitačního jevu. V tomto případě je použita plochá Lavalova dýza. Je tvořena dvěma průhlednými deskami vyrobenými z plastu o tloušťce 22 mm. V první desce je vyfrézován kanál pro průtok kapaliny se zúžením tvořící dýzu. Druhá deska slouží jako krycí a má pouze vstupní a výstupní díru se závitem. Mezi desky je vložena guma sloužící jako těsnění. Na krajích desek jsou čtyři ocelové L profily, které jsou společně s deskami staženy šrouby.



Obr. 5.3 3D model ploché Lavalovy dýzy

V obrázku (Obr. 5.4) jsou zakótovány rozměry ploché Lavalovy dýzy a také místa pro snímání tlaku  $p_1$  a  $p_2$ .



Obr. 5.4 rozměry ploché Lavalovy dýzy



### 5.2.3 Další prvky obvodu

#### Indukční průtokoměr

Výrobce: ELIS PLZEŇ a.s.

Typ: DN60 PN16 TG ISO 110

Provozní tlak: PN 16 (1,6 MPa)

Rozsah průtoků: 0,72 AŽ 72 m<sup>3</sup>hod<sup>-1</sup>



#### Vzduchový snímač průtoku

Výrobce: SMC Industrial Automation CZ s.r.o.

Typ: PFMV510-1

Provozní tlak: 5 bar (0,5 MPa)

Rozsah průtoků: 0 - 1 l<sup>3</sup>min<sup>-1</sup>

Je vybaven škrťcím ventilem



#### Snímače tlaku

Výrobce: CRESSTO

Typ: TMG 567 Z3G

Rozsah absolutního tlaku: (-1,10<sup>5</sup> - 5,10<sup>5</sup>) Pa

Rozsah relativního tlaku: (0 - 1,10<sup>5</sup>) Pa

Výstup: (0 - 20) mA

Závit: M 12 x 1,5 DIN 3852



#### Hydrogenerátor

Výrobce: GRUNDFOS s.r.o.

Typ: CR 20-5 A-F-A-E HQQE

Jmenovité otáčky: 29198 ot.min<sup>-1</sup>

Jmenovitý výkon: 5,5 kW

Dopravní výška: 62,6 m

Skutečný průtok: 18,4 m.h<sup>-1</sup>



## Frekvenční měnič

Typ: YASKAWA VS mini J7

Rozsah výkonů: síť 3 x 400V / 0,2 - 4 kW

Zdánlivý výkon: 7 kVA

Jmenovitý proud: 9,2 A

Maximální výstupní napětí: 3 x 380 - 460 V

Maximální výstupní frekvence: 400 Hz

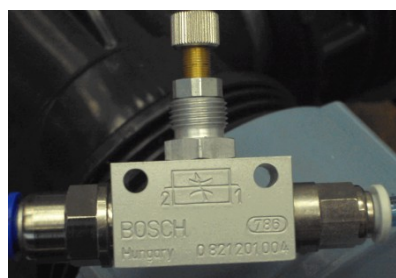
Přetížitelnost: 150% po dobu 1 min.



## Vzduchový ventil

Výrobce: Bosh

Typ regulační vzduchový škrtkicí ventil

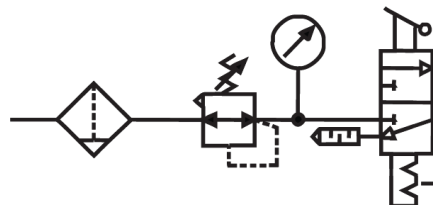


## Jednotka pro úpravu stlačeného vzduchu

Výrobce: SMC

Obsahuje: filtr, regulátor a

10 - barový pojišťovací ventil



## Nádrž

Výrobce: SOVEKO PLAST s.r.o.

Rozměry: 500 x 500 x 2400 mm

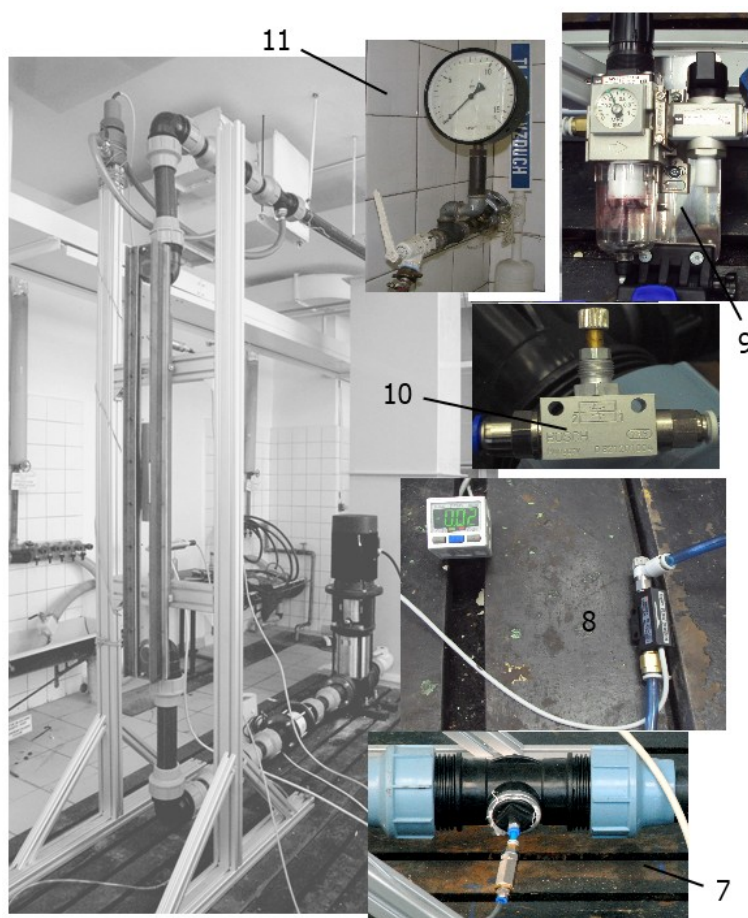
Materiál: polypropylen

## Potrubí, ventily a armatury

Výrobce: PVC ALFA s.r.o.

Vnější průměr: 63 mm

### 5.3 Zařízení pro sycení vzduchem



Obr. 5.5 Zařízení pro sycení vzduchem

Sycení kapaliny vzduchem usnadňuje vznik kavitace vlivem zvětšování vzduchových bublin a kavitačního tlaku v kavitačních jádrech. [11]

Zdrojem stlačeného vzduchu je centrální rozvod laboratoří. Regulaci průtoku zajišťuje regulační vzduchový škrtkový ventil a požadovaný tlak hlídá zařízení pro úpravu stlačeného vzduchu. Tlak vzduchu musí být dostatečně velký, aby překonal tlak kapaliny, do které je vháněn. Pro tento experiment jsem vybíral senzor průtoku s vhodným měřicím rozsahem (0 - 1 L.min<sup>-1</sup>). Rozhodoval jsem mezi průtokoměry firmy: SMC, FESTO a OMEGA. Nakonec byl zvolen a zakoupen průtokoměr SMC PFMV510-1, katalogový list je přiložen v přílohách.

## 6. Měření hydraulických veličin v obvodu, měření oblasti kavitace

Cílem měření je získání hodnot tlaků a průtoků vody a vzduchu pro zadání okrajových podmínek pro matematickou simulaci kavitace a rozměrů kavitační oblasti pro verifikaci matematického modelu.

### 6.1 Postup měření

Prvním krokem bylo zapojení měřidel do elektrické sítě. Následně byly snímače tlaku připojeny k měřidlu Hydrotechnik M5050 a byly vynulovány. Snímače měří v rozsahu absolutního tlaku -100 - 500 kPa. Dále byla změřena výška hladiny vody v nádrži. Pomocí frekvenčního měniče byl měněn průtok vody v obvodu. Po dosažení ustáleného stavu byl snímán průtok vody indukčním průtokoměrem, a zároveň byl snímán relativní tlak  $p_1$  před dýzou a  $p_2$  za dýzou (zakótovány v **Obr. 5.4**). Hodnoty tlaků jsou průměrné hodnoty několika záznamů a hodnota průtoku odpovídá průměrné hodnotě z 250 záznamů. Pro každou změnu průtoku byl vytvořen videozáznam průběhu kavitace v dýze o délce 15s. Bylo provedeno měření pro 10 rozdílných frekvencí čerpadla.

Před další sérií měření bylo připojeno zařízení pro sycení vzduchem a ve stejném místě byl také připojen snímač tlaku  $p_3$ . Z centrálního rozvodu laboratoří byl přiveden stlačený vzduch do zařízení pro úpravu stlačeného vzduchu. Zde byl tlak nastaven na 0,4 MPa. Pomocí regulačního škrťacího ventilu se snažilo dosáhnout konstantního objemového průtoku vzduchu. Senzorem průtoku byl měřen objemový průtok vzduchu v rozmezí 0 - 1dm<sup>3</sup>min<sup>-1</sup>. Opět bylo provedeno 10 měření s videozáznamy průběhu kavitace. Naměřené hodnoty byly zapsány do tabulky a dále zpracovány.

### 6.2 Výsledky měření

Výška hladiny vody v nádrži  $v = 109$  cm

Atmosférický tlak  $p_b = 102100$  Pa [18]

V tabulce jsou zaznamenány hodnoty objemového průtoku, relativních tlaků a obsahu rozpuštěného vzduchu při generování kavitace bez sycení vzduchem.

frekvence f	průtok $Q_{V_{H_2O}}$	průtok vzduchu $Q_{V_{vz}}$	přetlak $p_{p1}$	přetlak $p_{p2}$	obsah rozpuštěného vzduchu
[Hz]	[l/s]	[l/min]	[bar]	[bar]	[mg/l]
20	2,56	0	0,491	0,283	8,43
22	2,81	0	0,58	0,34	8,42
24	3,09	0	0,687	0,4	8,42
26	3,33	0	0,83	0,46	8,43
28	3,5	0	1,03	0,517	8,4
30	3,68	0	1,247	0,56	8,39
32	3,88	0	1,485	0,64	8,37
34	4,11	0	1,727	0,65	8,33
36	4,31	0	1,99	0,67	8,22
38	4,47	0	2,264	0,7	8,16

**Tabulka 6.1** Naměřené hodnoty bez sycení vzduchem

V tabulce jsou zaznamenány hodnoty průtoku, relativních tlaků a obsahu rozpuštěného vzduchu při generování kavitace se sycením vzduchem.

frekvence f	průtok $Q_{V_{H_2O}}$	průtok vzduchu $Q_{V_{vz}}$	přetlak $p_{p1}$	přetlak $p_{p2}$	přetlak $p_{p3}$	obsah rozpuštěného vzduchu
[Hz]	[l/s]	[l/min]	[bar]	[bar]	[bar]	[mg/l]
20	2,59	0,85	0,45	0,24	0,91	8,37
22	2,85	0,85	0,54	0,28	1,08	8,36
24	2,97	0,85	0,72	0,3	1,26	8,34
26	3,21	0,89	0,92	0,35	1,44	8,31
28	3,36	0,84	1,12	0,4	1,71	8,29
30	3,58	0,89	1,345	0,43	1,98	8,28
32	3,77	0,85	1,57	0,52	2,26	8,22
34	3,97	0,84	1,82	0,58	2,59	8,18
36	4,15	0,86	2,09	0,6	2,92	8,15
38	4,36	0,87	2,37	0,67	3,25	8,11

**Tabulka 6.2** Naměřené hodnoty při sycení vzduchem

### 6.3 Vyhodnocení měření

Výpočet absolutního tlaku z naměřeného relativního tlaku.

$$p_{a1} = p_b + p_{p1} \cdot p_b = 102100 + 0,491 \cdot 102100 = 152231 \text{ Pa} \quad (6.1)$$

$$p_{a2} = p_b + p_{p2} \cdot p_b = 102100 + 0,283 \cdot 102100 = 130994 \text{ Pa} \quad (6.2)$$

$$p_{a3} = p_b + p_{p3} \cdot p_b = 102100 + 0,91 \cdot 102100 = 195011 \text{ Pa} \quad (6.3)$$

$p_a$  [Pa] - absolutní tlak

$p_p$  [bar] - přetlak (relativní tlak)

$p_b$  [Pa] - atmosférický tlak

Výpočet tlakového spádu z přepočítaných absolutních tlaků před a za dýzou. [7]

$$\Delta p = p_{a1} - p_{a2} = 152231 - 130994 = 21237 \text{ Pa} \quad (6.4)$$

$\Delta p$  [Pa] - tlakový spád

$p_{a1}$  [Pa] - absolutní tlak před dýzou

$p_{a2}$  [Pa] - absolutní tlak za dýzou

V tabulce jsou vypočtené hodnoty absolutních tlaků a tlakového spádu pro měření bez sycení vzduchem

f	$Q_{V_{H_2O}}$	$Q_{V_{vz}}$	$p_{a1}$	$p_{a2}$	$\Delta p$
[Hz]	[l/s]	[l/min]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
20	2,56	0	152231,1	130994,3	21236,8
22	2,81	0	161318	136814	24504
24	3,09	0	172242,7	142940	29302,7
26	3,33	0	186843	149066	37777
28	3,5	0	207263	154885,7	52377,3
30	3,68	0	229418,7	159276	70142,7
32	3,88	0	253718,5	167444	86274,5
34	4,11	0	278426,7	168465	109961,7
36	4,31	0	305279	170507	134772
38	4,47	0	333254,4	173570	159684,4

**Tabulka 6.3** Vypočítané hodnoty bez sycení vzduchem

Výpočet hmotnostního průtoku vody pomocí objemového průtoku.

$$Q_{V_{H_2O}} = 2,56 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1} = 2,56 \text{ dm}^3\cdot\text{s}^{-1} = 2,56/1000 = 2,56\cdot 10^{-3} \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$$

$$Q_{m_{H_2O}} = Q_{v_{H_2O}} \cdot \rho_{H_2O} = 2,56 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 = 2,59 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1} \quad (6.5)$$

$Q_{V_{H_2O}}$  [ $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$ ] - objemový průtok vody

$Q_{m_{H_2O}}$  [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ] - hmotnostní průtok vody

$\rho_{H_2O}$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] - hustota vody

Převod objemového průtoku vzduchu.

$$Q_{V_{vz}} = 0,85 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1} = 0,85/1000/60 = 1,42\cdot 10^{-5} \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$$

$Q_{V_{vz}}$  [ $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$ ] - objemový průtok vzduchu



Výpočet hustoty vhaněného vzduchu pomocí stavové rovnice plynu. [7]

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \quad (6.6)$$

$$\rho_{vz} = \frac{p_{a3} \cdot M}{R \cdot T} = \frac{195011 \cdot 28,95 \cdot 10^{-3}}{8,314 \cdot 295} = 2,301 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (6.7)$$

$\rho_{vz}$  [kg.m<sup>-3</sup>] - hustota vzduchu

**M** [kg.mol<sup>-1</sup>] - molární hmotnost plynu (28,95.10<sup>-3</sup> kg.mol<sup>-1</sup>)

**R** [J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]- univerzální plynová konstanta (8,314 J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)

**T** [K] - teplota (22°C=295K)

Výpočet hmotnostního průtoku vzduchu pomocí objemového průtoku vzduchu. [7]

$$Qm_{vz} = Qv_{vz} \cdot \rho_{vz} = 1,42 \cdot 10^{-5} \cdot 2,301 = 3,267 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6.8)$$

Výpočet celkového hmotnostního průtoku pomocí hmotnostního průtoku vody a hmotnostního průtoku vzduchu.

$$Qm = Qm_{H2O} + Qm_{vz} = 2,59 + 3,267 \cdot 10^{-5} = 2,59003267 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6.9)$$

Výpočet objemového zlomku pomocí hmotnostního průtoku vody a hmotnostního průtoku vzduchu.

$$\frac{Qm_{vz}}{Qm_{H2O}} = Y = \frac{m_{vz}}{m_{H2O} + m_{vz}} = \frac{\rho_{vz} \cdot V_{vz}}{\rho_{H2O} \cdot V_{H2O} + \rho_{vz} \cdot V_{vz}} \doteq \frac{\rho_{vz} \cdot V_{vz}}{\rho_{H2O} \cdot V_{H2O}} = \frac{\rho_{vz}}{\rho_{H2O}} \cdot \alpha \quad (6.10)$$

$$\alpha = \frac{V_{vz}}{V_{H2O}} = \frac{Qm_{vz}}{Qm_{H2O}} \cdot \frac{\rho_{H2O}}{\rho_{vz}} = \frac{3,267 \cdot 10^{-5}}{2,59} \cdot \frac{1000}{2,3} = 5,484 \cdot 10^{-3} \quad (6.11)$$

$Y$	[1]	- hmotnostní zlomek	$\alpha$	[1]	-objemový zlomek
$m_{vz}$	[kg]	- hmotnost vzduchu	$V_{vz}$	[m <sup>3</sup> ]	- objem vzduchu
$m_{H2O}$	[kg]	- hmotnost vody	$V_{H2O}$	[m <sup>3</sup> ]	- objem vody

V tabulce jsou zaznamenány vypočítané hodnoty, ale hodnoty pro celkový průtok  $Qm$  v tabulce nejsou. Rozdíl průtoku vody  $Q_{H2O}$  a celkového průtoku  $Qm$  je zanedbatelně malý. Jelikož je vzduch přiváděný do zařízení stlačený, je pro nás naměřený objemový průtok  $Q_{vz}$  nevhodný. Byl proto přepočítán na hmotnostní průtok  $Qm_{vz}$ .

f	$p_{a1}$	$p_{a2}$	$p_{a3}$	$\Delta p$	$Qm_{H2O}$	$Q_{vz}$	$\rho$	$Qm_{vz}$	$\alpha$
[Hz]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[kg/s]	[m <sup>3</sup> /s]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/s]	[-]
20	148045	126604	195011	21441	2,59	0,00001416	2,3	0,00003260	0,00547
22	157234	130688	212368	26546	2,85	0,00001416	2,51	0,00003551	0,004971
24	175612	132730	230746	42882	2,97	0,00001416	2,72	0,00003858	0,00477
26	196032	137835	249124	58197	3,21	0,00001483	2,94	0,00004361	0,004621
28	216452	142940	276691	73512	3,36	0,00001400	3,27	0,00004572	0,004167
30	239424	146003	304258	93422	3,58	0,00001483	3,59	0,00005327	0,004143
32	262397	155192	332846	107205	3,77	0,00001416	3,93	0,00005565	0,003758
34	287922	161318	366539	126604	3,97	0,00001400	4,33	0,00006057	0,003526
36	315489	163360	400232	15229	4,15	0,00001433	4,72	0,00006771	0,003454
38	344077	170507	433925	173570	4,36	0,00001450	5,12	0,00007426	0,003326

**Tabulka 6.4** Vypočítané hodnoty při sycení vzduchem

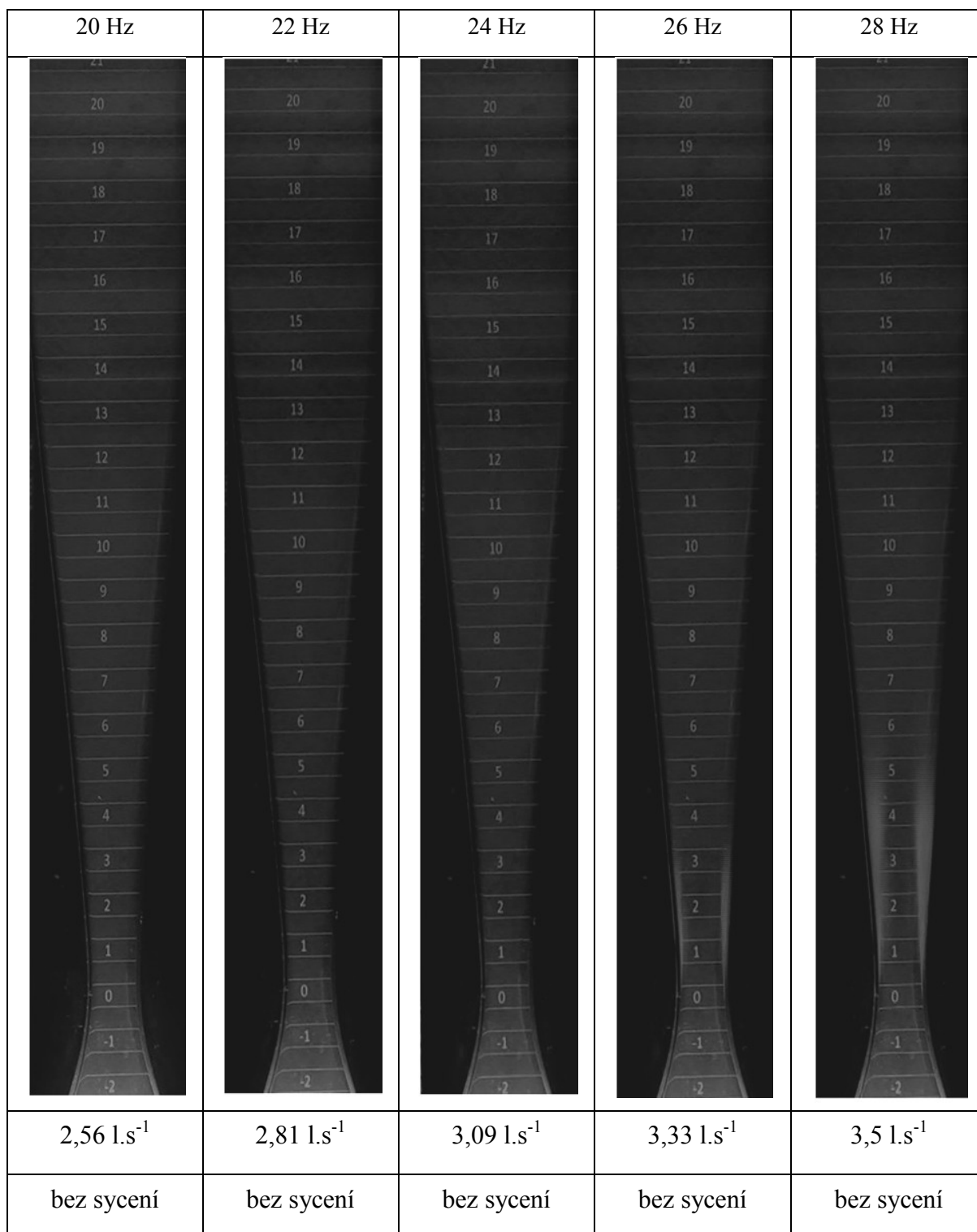
## 6.4 Zpracování videozáznamů

Kavitace je neustálený (nestacionární) děj, který se mění s velmi malým časovým krokem. Potřebujeme proto vyšetřit průměrnou hodnotu v určitém časovém úseku. Videozáznamy průběhů kavitace byly pořízeny digitální videokamerou Sony Handycam HDR-CX260V. Snímkovácí frekvence této kamery je 60p, což odpovídá snímání 60 obrázků za vteřinu. Při průměrné délce záznamu 15 vteřin se záznam skládá z 900 snímků. Časový krok mezi jednotlivými snímky je 0,016 vteřin. Samotný videozáznam je pro vyhodnocení nevhodný, je proto nutné jej upravit. Nejprve je záznam oříznut na vhodný rozměr. Poté převeden z barevného spektra do odstínů šedé barvy. Dalším krokem je rozdělení videozáznamu na jednotlivé snímky nejlépe ve formátu BMP. Formát BMP je velmi vhodný pro obrázky v odstínech šedi s ohledem na jejich velikost při ukládání. Skupina takto upravených snímků je vhodná pro vyhodnocení střední hodnoty kavitační oblasti.

Pro vyhodnocení střední hodnoty kavitační oblasti byl použit program vytvořený v interaktivním programovém prostředí MATLAB. Vyhodnocovací program vytvořil Ing. Daniel Himr, Ph.D.. Program pracuje s celou skupinou obrázků a na základě odstínů šedé barvy analyzuje a vyhodnotí průměrnou hodnotu kavitační oblasti. Takto vyhodnocené výsledky jsou cílem mého měření.

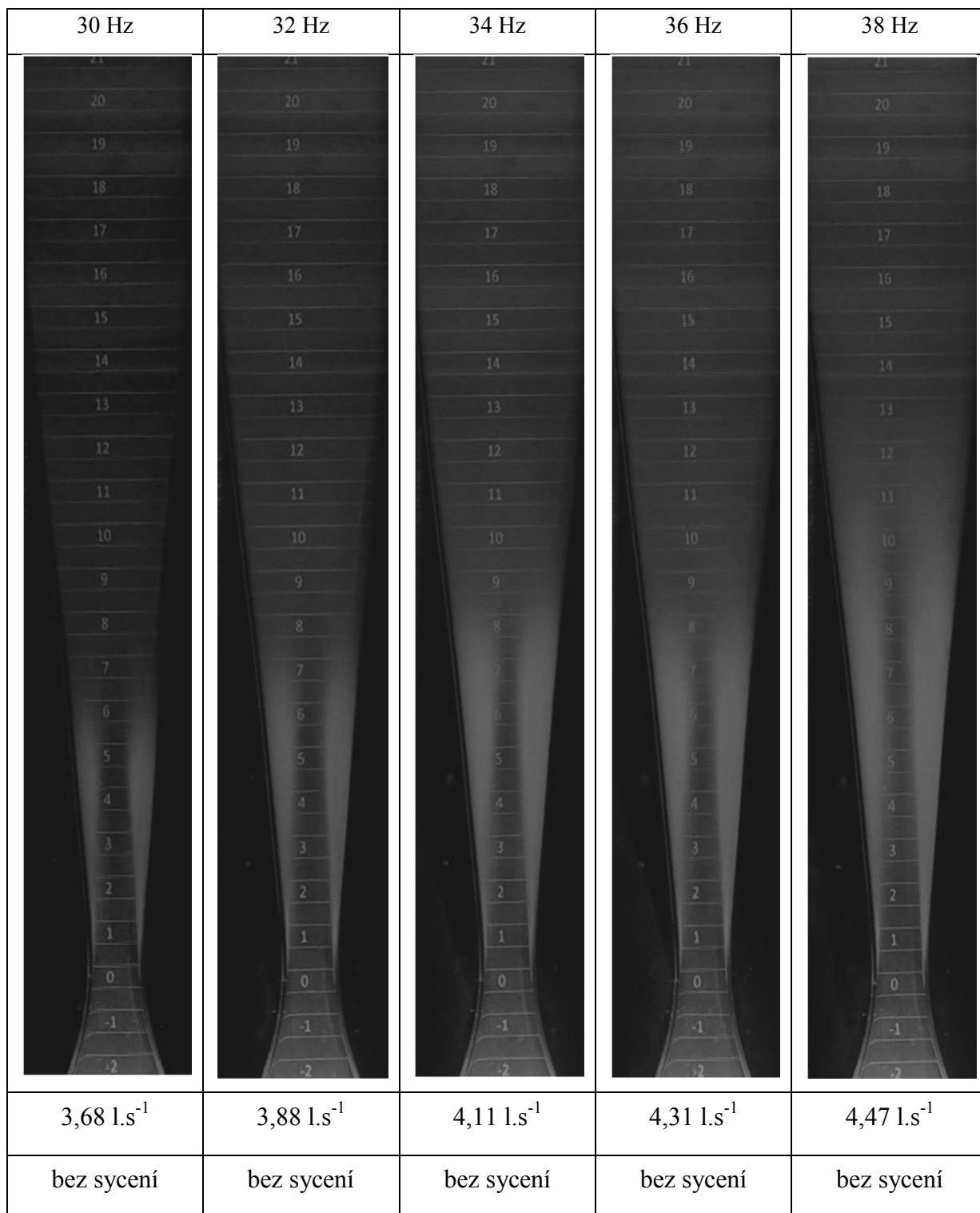
V následujícím porovnání jsou vyhodnocené fotografie pro střední hodnoty oblasti kavitačního jevu programem MATLAB.

Grafické vyhodnocení středních hodnot kavitačních oblastí pro frekvence 20 Hz - 28 Hz bez sycení vzduchem.



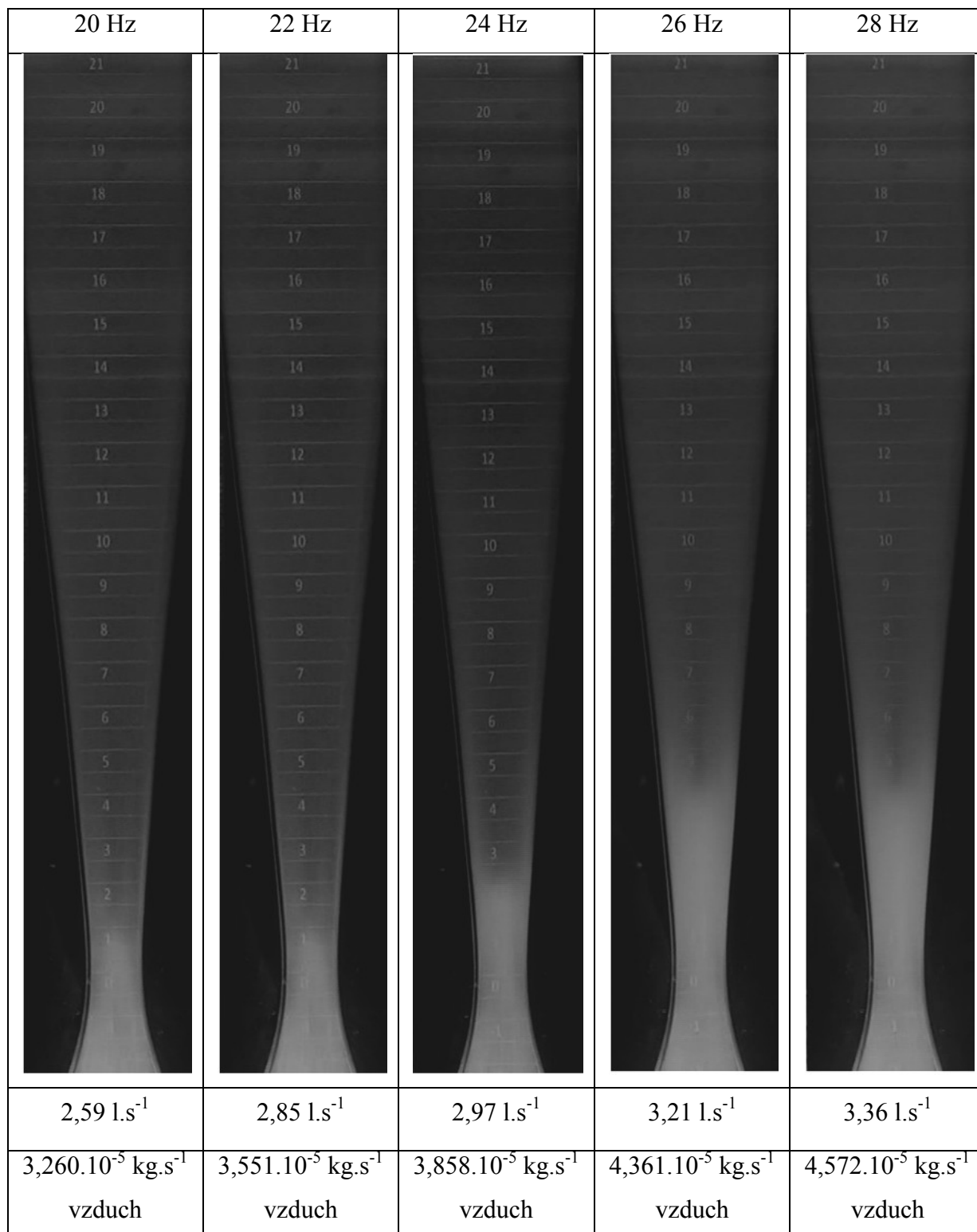
**Obr. 6.1** kavitační oblast 20Hz - 28Hz bez sycení vzduchem

Grafické vyhodnocení středních hodnot kavitačních oblastí pro frekvence 30 Hz - 38 Hz bez sycení vzduchem.



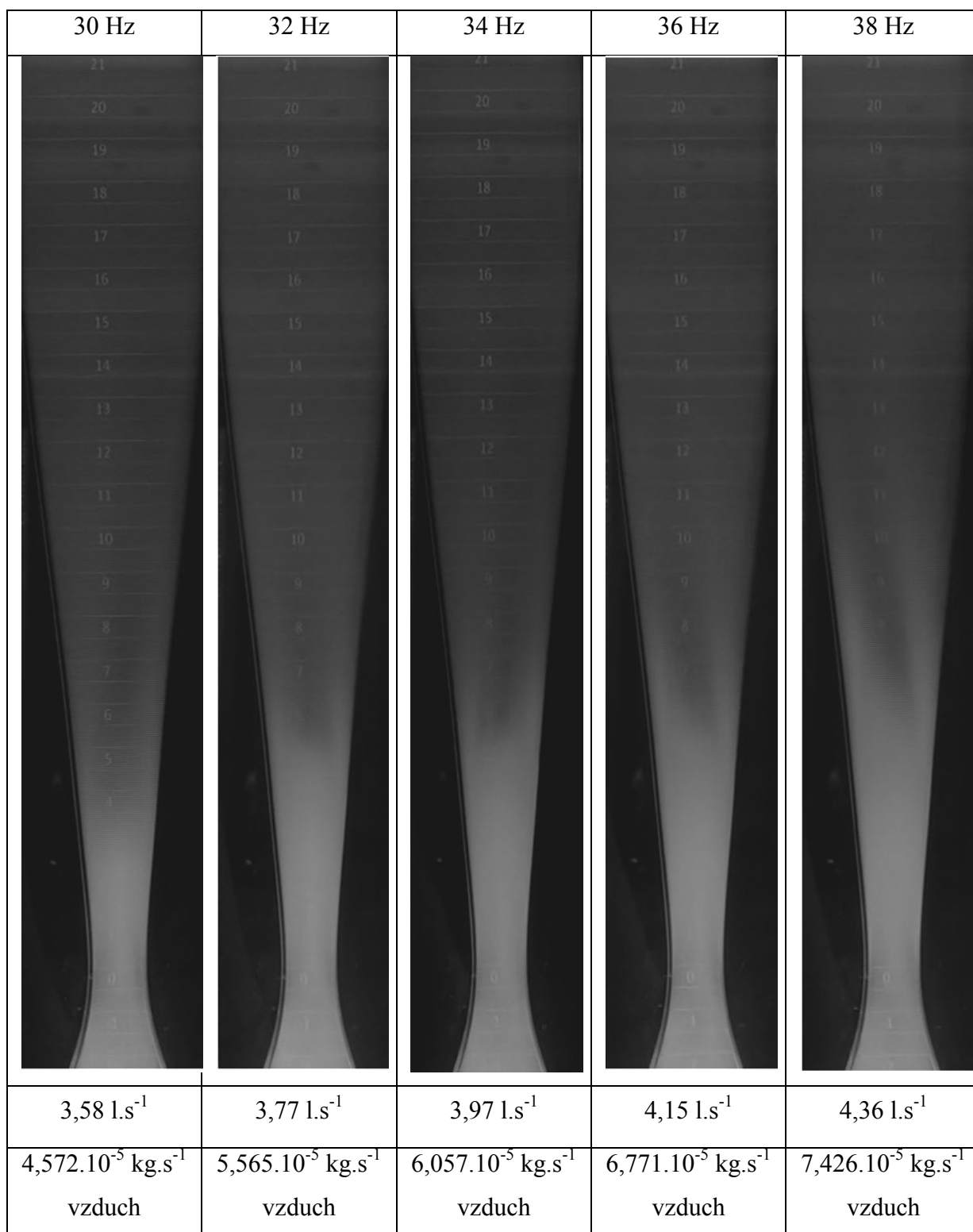
**Obr. 6.2** kavitační oblast 30Hz - 38Hz bez sycení vzduchem

Grafické vyhodnocení středních hodnot kavitačních oblastí pro frekvence 20 Hz - 28 Hz při sycení vzduchem.



**Obr. 6.3** kavitační oblast 20Hz - 28Hz syceno vzduchem

Grafické vyhodnocení středních hodnot kavitačních oblastí pro frekvence 30 Hz - 38 Hz při sycení vzduchem.

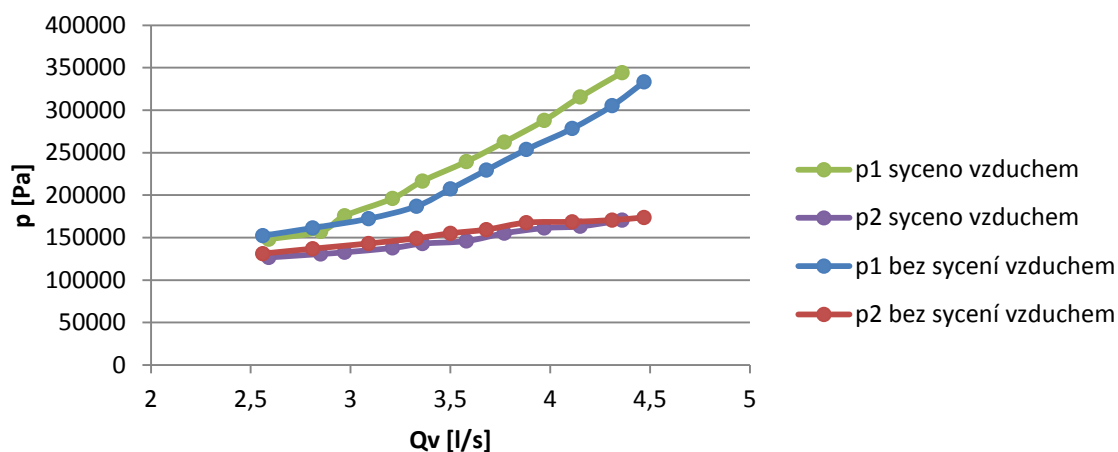


**Obr. 6.4** kavitační oblast 30Hz - 38Hz syceno vzduchem



## 7. Grafické zpracování výsledků a porovnání

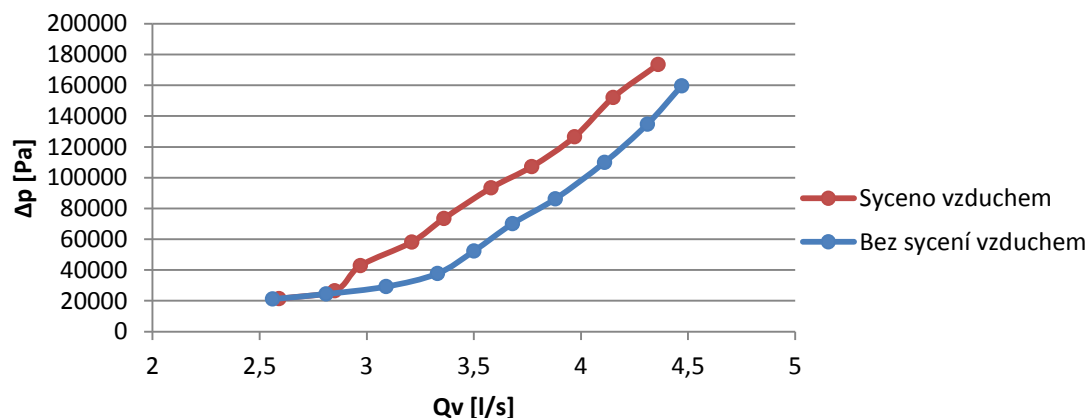
V grafu jsou uvedeny závislosti absolutních tlaků na průtoku před dýzou a za dýzou. Hodnoty jsou uvedeny pro sycení i bez sycení vzduchem.



**Graf 7.1** Závislost tlaků na průtoku

Z grafu vidíme, že tlak před dýzou je výrazně vyšší než tlak za dýzou a s rostoucím průtokem roste tlak za dýzou.

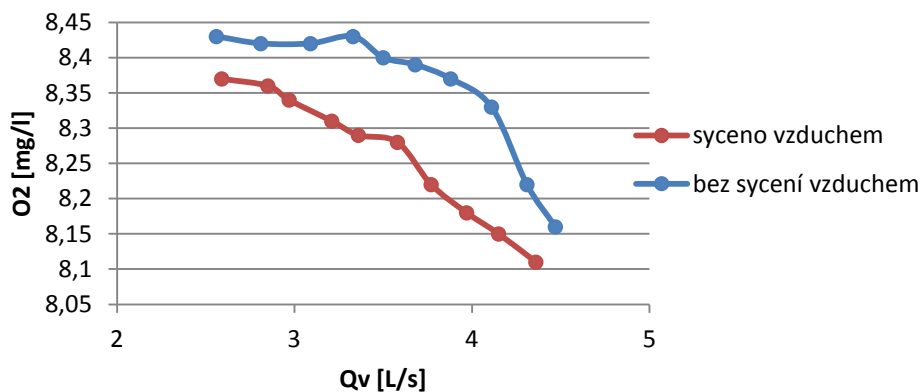
V grafu jsou uvedeny závislosti tlakového spádu na průtoku bez sycení i při sycení vzduchem.



**Graf 7.2** Závislost tlakového spádu na průtoku

V grafu pozorujeme, že s rostoucím průtokem roste tlakový spád, při sycení vzduchem je tlakový spád vyšší než bez sycení vzduchem.

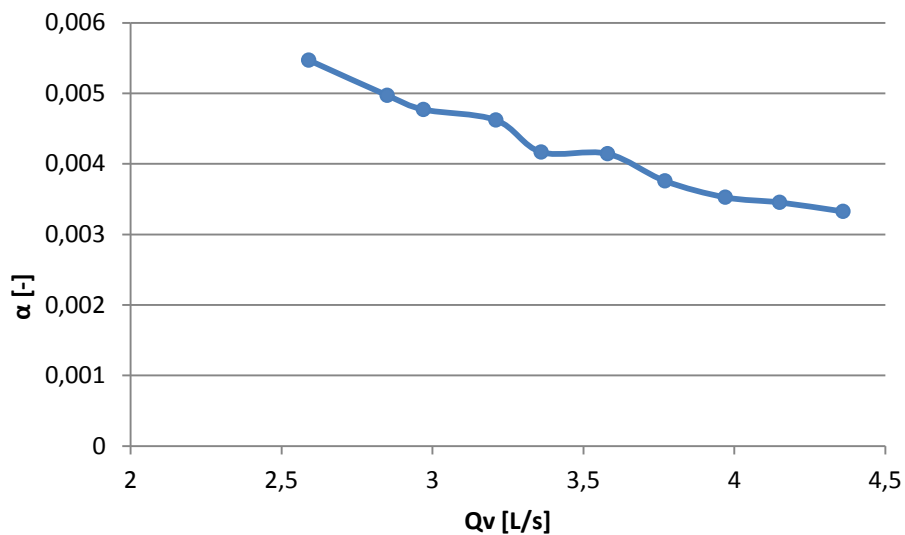
V grafu jsou uvedeny závislosti rozpuštěného kyslíku ve vodě na průtoku bez sycení i při sycení vzduchem.



**Graf 7.3** Závislost rozpuštěného kyslíku průtoku

Z grafu pozorujeme, že s rostoucím průtokem klesá hodnota rozpuštěného vzduchu.

V grafu je uvedena závislost objemového zlomku vzduchu ve vodě na průtoku při sycení vzduchem.



**Graf 7.4** Závislost objemového zlomku vzduchu na průtoku

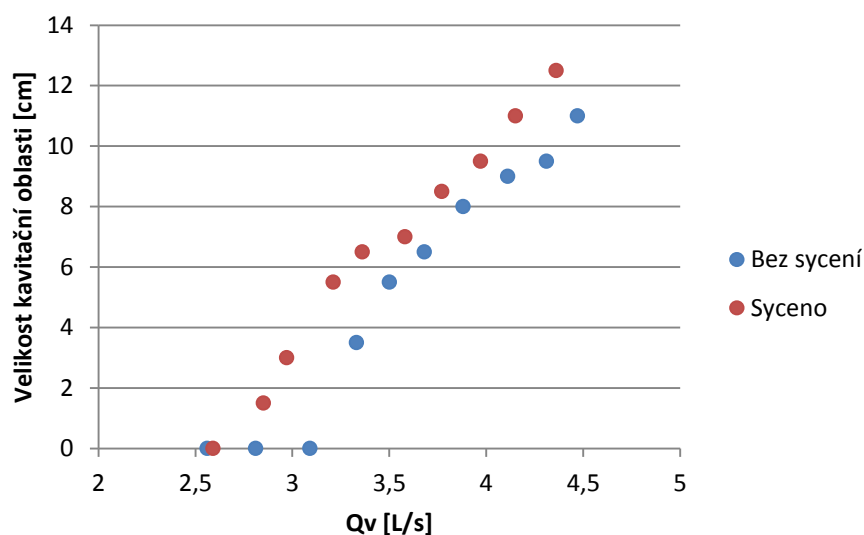
Pozorujeme, že s rostoucím průtokem klesá objemový zlomek vzduchu ve vodě.

V tabulce je uvedena velikost kavitační oblasti při frekvencích čerpadla 20Hz - 38Hz. Hodnoty jsou uvedeny v centimetrech.

Frekvence čerpadla	Bez sycení vzduchem	Syceno vzduchem
20 Hz	0	0
22 Hz	0	1,5
24 Hz	0	3
26 Hz	3	5,5
28 Hz	5,5	6,5
30 Hz	6,5	7
32 Hz	8	8,5
34 Hz	9	9,5
36 Hz	9,5	11
38 Hz	11	12,5

**Tabulka 7.1** Velikost kavitační oblasti



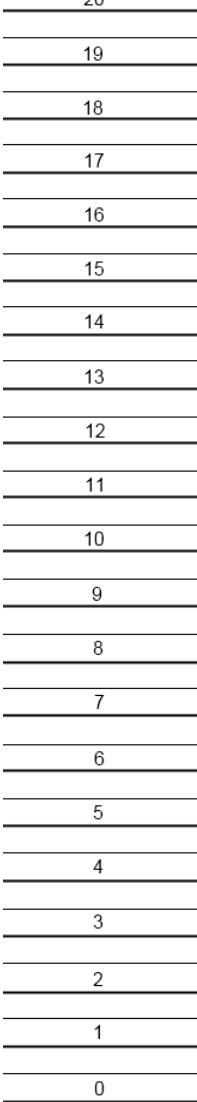
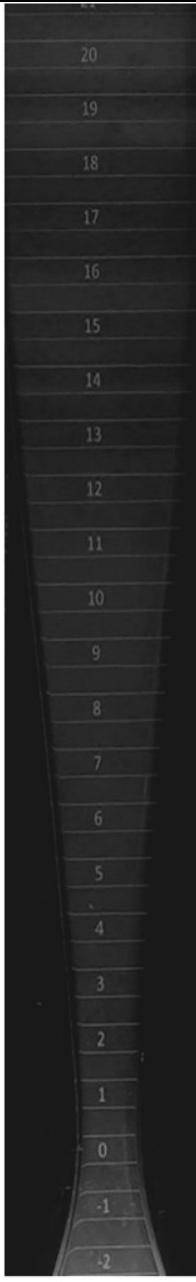

V grafu je uvedena závislost velikosti kavitační oblasti na průtoku bez sycení i při sycení vzduchem.



**Graf 7.5** Závislost kavitační oblasti na průtoku



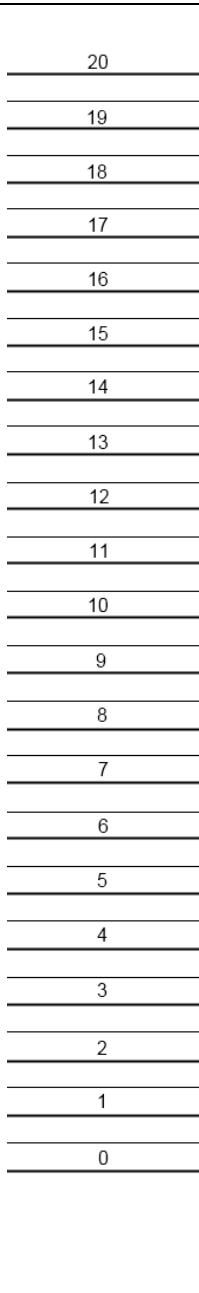


Z grafu vidíme, že kavitační děj probíhá u sycení vzduchem při nižších otáčkách než bez sycení vzduchem

Vizuální porovnání velikosti kavitační oblasti pro frekvence 20Hz a 22Hz. Použité měřítko odpovídá měřítku na fotografiích, hodnoty jsou udávány v cm.

20 Hz	22 Hz	Měřítka	20 Hz	22 Hz
				
bez sycení	syceno vzduchem	[cm]	bez sycení	syceno vzduchem
0 cm	0 cm	velikost kavitační oblasti	0 cm	1,5 cm

**Obr. 7.1** porovnání kavitačního děje při nižších průtocích

Vizuální porovnání velikosti kavitační oblasti pro frekvence 26Hz a 38Hz. Použité měřítko odpovídá měřítku na fotografiích, hodnoty jsou udávány v cm.

26 Hz	26 Hz	Měřítka	38 Hz	38 Hz
				
bez sycení	syceno vzduchem	[cm]	bez sycení	syceno vzduchem
3 cm	5,5 cm	velikost kavitační oblasti	11 cm	12,5 cm

**Obr. 7.2** Porovnání kavitačního děje při vyšších průtocích

## 8. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo získání okrajových podmínek pro ověření matematických modelů při numerickém řešení kavitačního jevu. Okrajové podmínky byly naměřeny a vypočítány. Dále byly porovnány a vyhodnoceny velikosti kavitačních oblastí a míra jejich ovlivnění při sycení vzduchem. Z výsledků je patrné, že při sycení kapaliny vzduchem vzniká kavitace při nižších průtocích vody. Pozorovatelný je také jev, kdy při kavitaci bez sycení vzduchem parní bubliny vznikají a drží se u stěn dýzy. Při sycení vzduchem naopak probíhá kavitace v celém prostoru dýzy.

Byl zrekonstruován obvod pro možnost sycení kapaliny vzduchem a v příloze jsou uvedeny katalogové listy senzoru průtoku.

Při vizualizaci kamerou bylo nevhodně zvoleno osvětlení dýzy, což se projevuje na fotografiích. Ve spodní části, jsou fotografie přesevětleny a výsledek střední hodnoty kavitační oblasti je nepřesný. Největší vliv má přesevětlení na spodní část dýzy, kde kavitační jev neprobíhá, ale na fotografiích se jeví viditelný.

Jedním z dalších zjištění při měření byl zvuk při kavitaci. Při sycení vzduchem byla intenzita zvuku jiná než při průběhu kavitace bez sycení vzduchem. Tohoto poznatku se při přezkoumání a případném potvrzení dá využít pro diagnostiku parní nebo vzduchové kavitace.

Pro další posun ve zkoumání kavitačního jevu by bylo vhodné pořídit lepší osvětlení a kvalitnější videokameru (vysokorychlostní).

## 9. Seznam použité literatury

- [1] NOSKIEVIČ, J. a kol.: *Kavitace v hydraulických strojích a zařízeních*. SNTL Praha 1989, 336 s., 1.vydání
- [2] Enress+Hauser. *Oxymax W COS61*, [online]. 2010 [cit. 2013-11-05]. Dostupné z WWW: [www.cz.endress.com/](http://www.cz.endress.com/)
- [3] FIRMA Enress+Hauser. *Liquisys M COM 223/253 : uživatelský manuál*. 2010. 120 s
- [4] SHUBERT, J. *Zařízení pro sycení kapaliny vzduchem*. Ostrava, 2011. Bakalářská práce. VŠB-TU Ostrava
- [5] ADAMEC, R. *Vliv obsahu vzduchu na hydraulický ráz*. Ostrava, 2010. 57 s. Bakalářská práce. VŠB-TU Ostrava
- [6] MLKVIK, M. *Výskum viac fázových tokov v hydraulických kanáloch veľmi malých rozmerov*. Bratislava, 2012. Disertační práce. Slovenská Technická Univerzita v Bratislave
- [7] DRÁBKOVÁ, S. *Mechanika tekutin*. Ostrava, 2007. 248 s. (Elearningová učebnice) Vysoká škola báňská - TU Ostrava, , ISBN 978-80-248-1508-4.
- [8] HIMR, D. *Program na vyhodnocení průměrné hodnoty kavitační oblasti*. Počítačový program MATLAB
- [9] AOS TECHNOLOGIES. *Vysokorychlostní kamery* [online]. 2015. [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: <http://www.aostechnologies.com/high-speed-cameras-for-precision-motion-analysis/>
- [10] MILLER, D.S. *Internal flow systems*. Cranfield, Bedford: BHRA (Information Services), 1990. 396 s. ISBN 0947711775.
- [11] NOSKIEVIČ, J., *Kavitace*. 1. Vyd. Praha: Academia 1969. 278 s.
- [12] BABEJOVÁ, S. *Experimentální zařízení pro vizualizaci vzniku a vývoje kavitace*. Ostrava, 2010. 69 s. Diplomová práce. VŠB - Technická Univerzita Ostrava
- [13] *Rozpustnost plynů ve vodě* [online]. [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: [http://www.orbispictus.cz/id32402/ve%282da/pr%282i%281rodni%281\\_ve%282dy/chemie/Rozpustnost\\_plynu\\_ve\\_vode.htm](http://www.orbispictus.cz/id32402/ve%282da/pr%282i%281rodni%281_ve%282dy/chemie/Rozpustnost_plynu_ve_vode.htm)
- [14] KOPÁČEK, J. *Technická diagnostika hydraulických mechanismů*. 1. vyd. Praha, 1990. 159 s. ISBN 80-030-0308-3.
- [15] *Střelnice, Balistika, Technika: Rychlokamery* [online]. [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: <http://www.rucevzhuru.cz/index.php/video/53-rychlokamery.html>



- [16] JABLONSKÁ, J. KOZUBKOVÁ, K. a BOJKO M. Multiphase Flow and Cavitation: Comparison of Flow in Planar and Three-dimensional Nozzle. : 8 s. 2015. Ostrava
- [17] *E-automatizace: Rychlostní průtokoměry* [online]. [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: <http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmr/0362.htm>
- [18] *Aktuální počasí* [online]. [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://pocasi.divoch.cz/ostrava.php>
- [19] *Rozpustnost plynů ve vodě: Henryho zákon* [online]. 2000. [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: [http://planta.aquariana.cz/plyny\\_ve\\_vode.htm](http://planta.aquariana.cz/plyny_ve_vode.htm)
- [20] *Energetický Ústav Obor fluidního inženýrství Viktora Kaplana: Testy kavitační eroze* [online]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://www.eu.fme.vutbr.cz/odbor-fluidniho-inzenyrstvi/rudolf04>

## 10. Seznam příloh

Katalogový list senzoru průtoku vzduchu SMC PFMV510

# Flow Sensor Series PFMV5



## How to Order

PFMV5 **05** - 1 -

• Measurement flow range •

05	0.0 to 0.5 $\text{dm}^3/\text{min}$
10	0.0 to 1.0 $\text{dm}^3/\text{min}$
30	0.0 to 3.0 $\text{dm}^3/\text{min}$
05F	-0.5 to 0.5 $\text{dm}^3/\text{min}$
10F	-1.0 to 1.0 $\text{dm}^3/\text{min}$
30F	-3.0 to 3.0 $\text{dm}^3/\text{min}$

• Output specification •

1	Analog output (1 to 5 V)
---	--------------------------

• Option (shipped together)

Nil	None
A	With L-type bracket

+ 2 L-type brackets (with 2 mounting screws) are included.

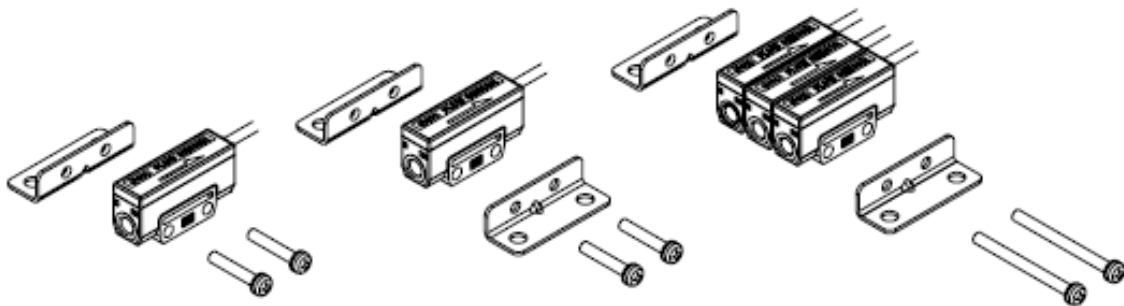
• Instruction manual

Nil	With instruction manual (Leaflet: Japanese and English)
N	None

## Option/Part No.

If a single option or manifold mounting are required, order sensors with the part numbers below separately.

Part no.	Stations	Remarks
ZS-36-A1	For 1 station (for single unit)	2 L-type brackets, 2 mounting screws M3 x 15L
ZS-36-A2	For 2 stations	2 L-type brackets, 2 mounting screws M3 x 25L
ZS-36-A3	For 3 stations	2 L-type brackets, 2 mounting screws M3 x 35L
ZS-36-A4	For 4 stations	2 L-type brackets, 2 mounting screws M3 x 45L
ZS-36-A5	For 5 stations	2 L-type brackets, 2 mounting screws M3 x 55L



PFM

PFMV

PF2A

PF2W

PF2D

IF



951

# Series PFMV5

## Specifications

Model	PFMV505	PFMV510	PFMV530	PFMV505F	PFMV510F	PFMV530F
Applicable fluid	Dry air, N <sub>2</sub> (JIS B 8992-1 1.1.2 to 1.6.2: 2003)					
Rated flow range (Flow rate range) <small>Note 1)</small>	0 to 0.5 ℓ/min	0 to 1 ℓ/min	0 to 3 ℓ/min	-0.5 to 0.5 ℓ/min <small>Note 2)</small>	-1 to 1 ℓ/min <small>Note 2)</small>	-3 to 3 ℓ/min <small>Note 2)</small>
Repeatability	±2 F.S. or less <small>Note 3)</small>					
Pressure characteristics (Based on 0 kPa <small>Note 4)</small> )	±2% F.S. or less (0 to 900 kPa) ±5% F.S. or less (-70 to 0 kPa)					
Temperature characteristics (Based on 25°C)	±2% F.S. or less (15 to 35°C) ±5% F.S. or less (0 to 50°C)					
Rated pressure range <small>Note 5)</small>	-70 kPa to 900 kPa					
Operating pressure range <small>Note 6)</small>	-100 kPa to 400 kPa					
Proof pressure	500 kPa					
Analog output (Non-linear output)	Voltage output: 1 to 5 V, Output impedance: Approx. 1 kΩ					
Response time	5 ms or less (90% response)					
Power supply voltage	12 to 24 VDC ± 10%, Ripple (p-p) ± 10% or less (with polarity protection)					
Current consumption	16 mA or less					
Environmental resistance	Enclosure	IP40				
	Fluid temperature	0 to 50°C (with no freezing and condensation)				
	Operating temperature range	0 to 50°C (with no freezing and condensation)				
	Stored temperature range	-10 to 60°C (with no freezing and condensation)				
	Operating humidity range	35 to 85% R.H. (with no condensation)				
	Stored humidity range	35 to 85% R.H. (with no condensation)				
	Withstand voltage	1000 VAC for 1 min. between whole charging part and case				
	Insulation resistance	50 MΩ or more (500 VDC Mega) between whole charging part and case				
	Vibration resistance	10 to 150 Hz with a 1.5 mm amplitude, max. 98 m/s <sup>2</sup> , in each X, Y, Z direction for 2 hrs (De-energized)				
	Impact resistance	980 m/s <sup>2</sup> in X, Y, Z directions 3 times each (De-energized)				
	Port size	M5 x 0.8 (Tightening torque: 1 to 1.5 N·m)				
Wetted parts material	PPS, Si, Au, Stainless steel 316, C3604 (Electroless nickel plated)					
Lead wire	Vinyl cable cord, 3 cores ø2.6, 0.15 mm <sup>2</sup> , 2 m					
Mass	10 g (excluding lead wire)					

Note 1) Volume flow converted value under standard conditions (ANR) of 20°C, 101.3 kPa and 65% RH

Note 2) Analog output indicates 3 V when the flow rate is 0. When the flow direction is from IN to OUT, the output is changed to 5 V, and when it's from OUT to IN, the output is changed to 1 V.

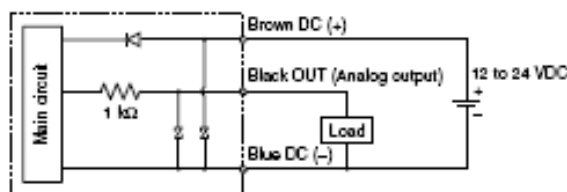
Note 3) The unit % F.S. is based on the full scale of analog 4 V (1-5 V).

Note 4) 0 kPa indicates the atmospheric release.

Note 5) Pressure range that satisfies the product specifications

Note 6) Applicable pressure range

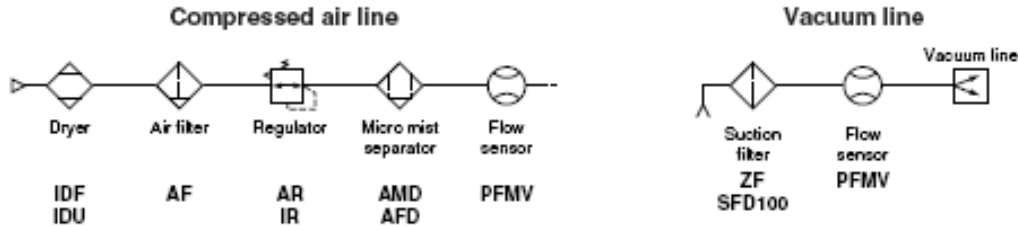
## Internal Circuits and Wiring Examples



### Lead Wire Specifications

Rated temperature	80°C	
Rated voltage	1000 V	
Number of wires	3	
Conductor	Material	Copper alloy wire
	Construction	7/11/0.05 mm
	External diameter	0.68 mm
Insulator	Material	Cross-linked vinyl chloride (XL-PVC)
	External diameter	0.88 mm
	Standard thickness	0.15 mm
	Colors	Brown, Blue, Black
Sheath	Material	Oil-resistant/Heat resistant vinyl
	Standard thickness	0.35 mm
	Color	Light gray (Munsell N7 equivalent)
Finished external diameter	2.6 <sup>+0.05</sup> <sub>-0.05</sub> mm	

### Recommended Pneumatic Circuits



### Recommended Fittings

#### One-touch Fitting/Series KQ2

Type	Tubing O.D. (mm)	Port size	Model
Male connector	4	M5 x 0.8	KQ2H04-M5
Hex. socket head male connector			KQ2S04-M5
Male elbow			KQ2L04-M5

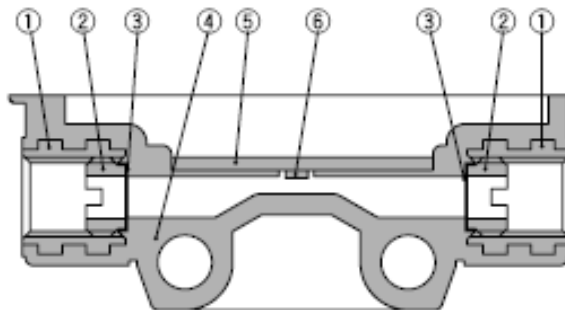
#### One-touch Mini/Series KJ

Type	Tubing O.D. (mm)	Port size	Model
Male connector	4	M5 x 0.8	KJH04-M5
Hex. socket head male connector			KJS04-M5
Male elbow			KJL04-M5

#### Miniature Fitting/Series M

Type	Tubing O.D. (mm)	Port size	Model
Barb fitting for nylon tube	4	M5 x 0.8	M-5AN-4
	6		M-5AN-6

### Internal Construction



#### Component Parts

No.	Description	Material
1	Fitting for piping	C3604 (Electroless nickel plated)
2	Mesh holding screw	
3	Mesh	Stainless steel 316
4	Body	PPS
5	Print circuit board	GE4F
6	Sensor chip	Si, Au

PFM  
**PFMV**  
 PF2A  
 PF2W  
 PF2D  
 IF

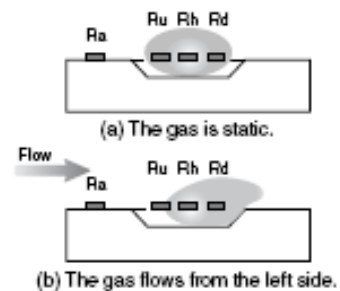
### Detection Principle

This MEMS sensor chip consists of upstream temperature measuring sensor ( $R_u$ ) and downstream temperature measuring sensor ( $R_d$ ), which are placed symmetrically from the center of a platinum thin film coated heater ( $R_h$ ) mounted on a membrane, and an ambient temperature sensor ( $R_a$ ) for measuring gas temperature.

The principle is as shown in the diagram on the right. (a) When the gas is static, the temperature distribution of heated gas centered around  $R_h$  is uniform, and  $R_u$  and  $R_d$  have the same resistance. (b) When the gas flows from the left side, it upsets the balance of the temperature distribution of heated gas, and the resistance of  $R_d$  becomes greater than that of  $R_u$ .

The difference in resistance between  $R_u$  and  $R_d$  is proportional to the gas velocity, so measurement and analysis of the resistance can show the flow direction and velocity of the gas.

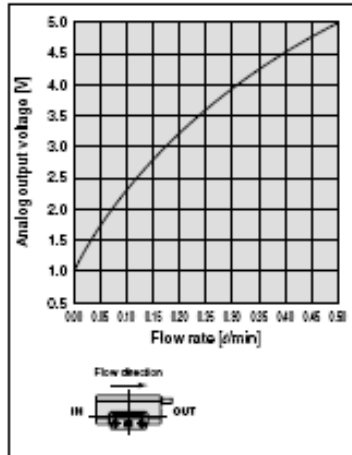
$R_a$  is used to compensate the gas and/or ambient temperature.



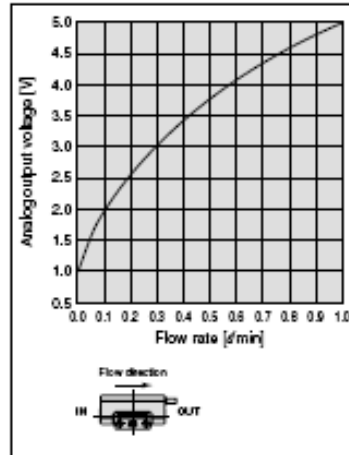
# Series PFMV5

## Analog Output (Non-linear output)

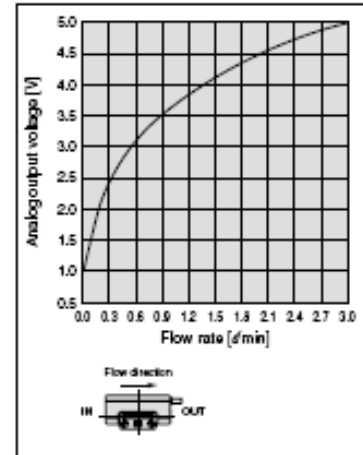
PFMV505-1



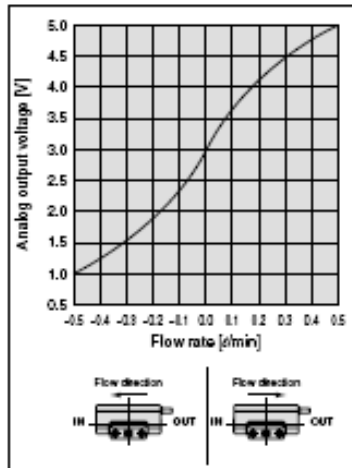
PFMV510-1



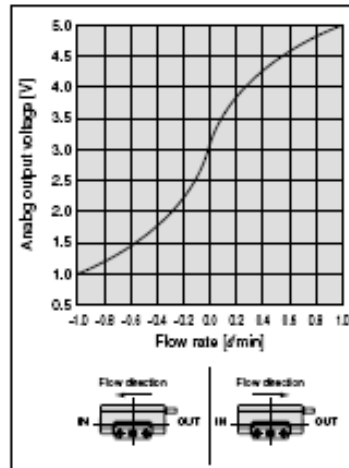
PFMV530-1



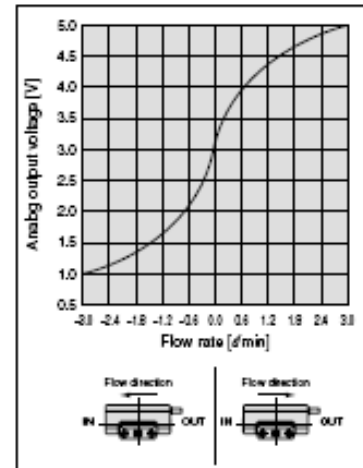
PFMV505F-1



PFMV510F-1

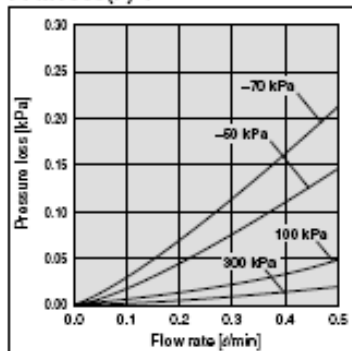


PFMV530F-1

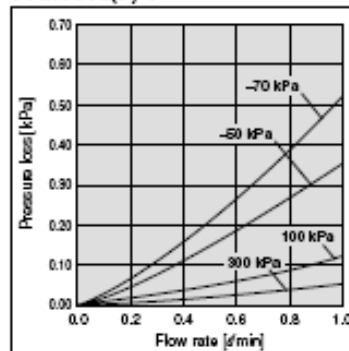


## Pressure Loss

PFMV505(F)-1



PFMV510(F)-1



PFMV530(F)-1

