



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

ENERGIE Z KAVITACE

ENERGY FROM CAVITATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matej Ochodnický

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

BRNO 2025

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Matej Ochodnický**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.**
Akademický rok: 2024/25

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Energie z kavitace

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Kavitace je tvorba bublinek v kapalině za velmi nízkého tlaku (menšího než je tlak sytých par). Zánik kavitačních bublin je doprovázen silnými tlakovými pulzacemi, které dopadají na obtékané předměty (např. lopatka v hydraulickém tunelu). Vědecká otázka je: Lze generovat elektrické napětí při zániku kavitační bublinky v blízkosti fólie z piezoelektrického materiálu?

Cíle bakalářské práce:

Cílem BP bude prozkoumat možnosti tzv. energy harvesting z kavitujičoho proudění, kdy je elektrické napětí generováno deformací piezoelektrické fólie zanikajícími kavitačními bublinkami. Práce bude mít část rešeršní a část experimentální.

Seznam doporučené literatury:

NOSKIEVIČ, Jaromír. Kavitace. Praha: Academia, 1989.

FRANC, Jean-Pierre a MICHEL, Jean-Marie. Fundamentals of Cavitation. Springer, 2006. ISBN 978-1-4020-2233-3.

GEVARI, M.T.; GHORBANI, M.; SVAGAN, A.J.; GRISHENKOV, D. a KOSAR, A. Energy harvesting with micro scale hydrodynamic cavitation-thermoelectric generation coupling. AIP Advances. 2019, roč. 9.

MÜLLER, M.; HUJER, J. a DANČOVÁ, P. Dynamic behaviour of cavitation bubble close to a flexible wall. EPJ Web of Conferences. 2022, roč. 264.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

V tejto bakalárskej práci boli skúmané možnosti spätného získavania energie z kavitácie vo fluidných systémoch za pomoci piezoelektrického článku. Konkrétne sa zameriava na návrh dopadových komponent vyrobených za pomoci FDM tlače a následného experimentálneho overenia v laboratórnej hydraulikej trati s riadeným prietokom. Na základe získaných výsledkov sme určili, ako geometria dopadových lopatiek a nastavenie záťažového obvodu ovplyvňujú generovaný výkon. V experimentálnej fáze boli navrhnuté a skonštruované viaceré druhy dopadových lopatiek vybavené MFC *patchom* a následne testované pri prietokoch, ktoré definujú rôzne kavitáčne štádia v našom prevedení. Experimentálne výsledky boli v práci vyhodnotené a finálne diskutované.

Kľúčové slová

kavitácia, energy harvesting, piezoelektrický jav, MFC

ABSTRACT

This bachelor's thesis was focused on exploring the possibilities of energy recovery, from cavitation in fluid systems using a piezoelectric transducer. Specifically focused on the design of impact components manufactured by FDM printing and their experimental validation in a hydraulic system with controlled flow. Based on the obtained results, we determined how the geometry of the impact components and the configuration of the load circuit affect the generated power. In the experimental phase, we've designed and built several types of impact components that contained the MFC patch. Then we tested each type at several flow rates corresponding to different cavitation stages. The experimental results were evaluated and discussed.

Key words

cavitation, energy harvesting, piezoelectric effect, micro-fibre-composite (MFC)

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

OCHODNICKÝ, Matej. *Energie z kavitace*. Online, bakalářská práce. Pavel RUDOLF (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/165915>. [cit. 2025-05-23].

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému **Energie z kavitace** vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov uvedených v zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

.....
Dátum

.....
Meno a priezvisko

Obsah

Úvod	7
1 Kavitácia	8
1.1 Princíp kavitácie.....	8
1.1.1 Dynamika bublinky	8
1.1.2 Kavitačné číslo	11
1.1.3 Druh prúdenia.....	12
1.2 Vplyv fyzikálnych vlastností kvapaliny na kavitáciu.....	12
1.2.1 Vplyv povrchového napätia, viskozity a obsahu vzduchu.....	12
1.2.2 Vplyv viskozity kvapaliny	13
1.2.3 Vplyv nerozpusteného vzduchu v kvapaline	13
1.2.4 Vplyv teploty na kavitáciu	13
1.3 Zánik bublinky	14
1.3.1 Symetrický prípad kolapsu kavitačnej bublinky.....	14
1.3.2 Asymetrický prípad kolapsu kavitačnej bublinky.....	15
2 Energy harvesting.....	18
2.1 Spôsoby energy harvesting.....	18
3 Piezoelektrický jav	19
3.1 Princíp piezoelektrického javu	19
3.2 Elektrostriekcia.....	20
3.3 MFC (Macro Fiber Composite)	20
3.4 Spôsoby použitia MFC pri energy harvesting.....	23
4 Experimentálna časť	26
4.1 Ciele experimentu	27
4.2 Návrh experimentu	27
4.2.1 Experimentálne zariadenie	28
4.2.2 Návrh dopadovej komponenty	32
4.3 Vyhodnotenie experimentu.....	36
4.3.1 Prvé meranie	36
4.3.2 Druhé meranie	38
5 Diskusia.....	41
6 Záver.....	43
Použité informačné zdroje	44
Zoznam symbolov a skratiek	47

Úvod

S rastúcim dopytom obnoviteľných a udržateľných zdrojov energie sa výskum čoraz viac zameriava na netradičné metódy získavania energie. Jednou z metód, ktoré predstavujú značný potenciál spätného získavania energie, je energy harvesting z kavitácie – javu, ktorý sa bežne vyskytuje vo fluidných systémoch s premenlivým tlakom a prúdením. Kavitácia je za bežných okolností nežiaducim javom, ktorému sa pri návrhu snažíme predovšetkým vyhnúť, pretože má nepriaznivé účinky na funkciu a životnosť hydraulických systémov. V správne riadenom prostredí však môže predstavovať zdroj energie, ktorý je možné opätovne využiť.

V tejto bakalárskej práci sa budeme zaoberať možnosťou získavania energie z kavitácie pomocou mechanických prvkov, ktorými je možné premieňať tlakové impulzy a vibrácie na elektrickú energiu. Cieľom práce je overiť túto možnosť experimentálne, analyzovať efektívnosť prenosu energie a navrhnuť optimalizácie na zvýšenie účinnosti systému. Súčasťou práce je návrh a konštrukcia dopadovej komponenty (lopatky), ktorá umožňuje generovanie a zber energie z kavitácie v kontrolovanom prostredí.

V úvode práce sú popísané fyzikálne princípy kavitácie a mechanizmy jej vzniku. Následne sa venujeme možnostiam jej technického využitia, návrhu experimentálneho zariadenia, zberu a vyhodnoteniu dát. Výsledky práce môžu slúžiť ako základ pre ďalší výskum v oblasti energy harvestingu v prostredí s kvapalinovým prúdením.

1 Kavitácia

Kavitácia je jav, ktorý vzniká pri prudkom lokálnom poklese statického tlaku pod tlak nasýtených pár pri danej teplote. Pokles tlaku môže nastať rôznymi spôsobmi, ktoré definujú o aký typ kavitácie sa jedná.

Najčastejším druhom kavitácie je hydrodynamická kavitácia, ktorá vzniká v prúdiacej kvapaline, najčastejšie vplyvom zúženia miesta v potrubí, napríklad za pomoci Ventúriho dýzy, clony alebo ventilu. Pri prietoku zúženým potrubím sa zvyšuje rýchlosť prúdenia, tlak náhle klesá, čo vedie k tvorbe kavitačných bublín, ich rastu a následnému zániku.

Kavitácia môže vzniknúť aj v kvapaline, ktorá je v klúde. Môže byť vyvolaná vystavením kvapaliny vysokofrekvenčnej tlakovej vlny napr. ultrazvuku. Vyvolané akustické tlakové vlny rozkmitajú kvapalinu a ako dôsledok zmeny amplitúd vln vznikajú a zanikajú kavitačné bubliny. Tento druh kavitácie nazývame akustická kavitácia. [1]

Až v poslednej dobe začala byť kavitácia vnímaná pozitívne a využívaná v rôznych odvetviach, ktorými sú napríklad zdravotníctvo, čistenie odpadových vôd ale aj "energy harvesting".

1.1 Princíp kavitácie

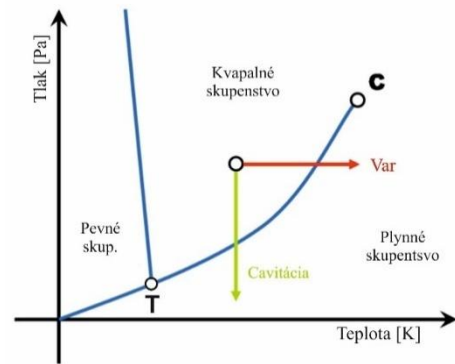
Kavitácia pozostáva z tvorby bublín, ich rastu a následnej implózie. Pri znížení tlaku na tlak sýtych pár, tzv. kavitačný tlak, dôjde k porušeniu súvislosti kvapaliny a vzniká kavitačná bublinka. Kavitačné bublinky sa objavujú v mieste porušenia súdržnosti kvapaliny. K porušeniu musia byť prekonané kohézne sily molekúl, definované ako pevnosť kvapaliny. Tú značne ovplyvňuje „čistota vody“, teda obsah nerozpustených plynov či mechanických častíc, nazývaná aj kavitačné jadro. [1]

Ďalším faktorom ovplyvňujúcim kavitáciu je teplota. Z fázového diagramu **Obrázok 1-1** je vidieť, že pri vyššej teplote je potrebný nižší pokles tlaku pre vznik kavitácie.

Pri znížení tlaku na kavitačný tlak vzniká kavitácia a v prípade že tlak naďalej klesá alebo ostáva konštantný, bublina naďalej rastie. Pri hydrodynamickej kavitácii, teda vzniku bublín v prúdiacej kvapaline, sa bublina presúva v smere prúdenia do miesta s vyšším tlakom a náhle zaniká, „imploduje“. Zánik bublín zapríčini rázovú vlnu, ktorá sa šíri kvapalinou vo forme pulzov. Ak nastane implózia v tesnej blízkosti pevného materiálu, má na neho deštruktívny účinok v podobe vytrhávania častíc materiálu.

1.1.1 Dynamika bublinky

Rayleigh-Plessetová rovnica je nelineárna diferenciálna rovnica druhého radu, ktorá popisuje dynamiku guľovej bubliny s fixným stredom, ktorá podlieha rovnomerným zmenám tlaku v nekonečne. Rovnica vyjadruje základné vlastnosti niektorých praktických prípadov za určitých predpokladov, ako napríklad zániku, vzniku alebo oscilácie kavitačnej bubliny. [2]



Obrázok 1-1 Fázový diagram vody, upravené podľa

Predpoklady: - nestlačiteľná Newtonská alebo neviskózna kvapalina

- zanedbanie gravitačného zrýchlenia

- obsah vzduchu v bublinách je konštantný, zanedbávame akúkoľvek výmenu tepla s okolím. Teda ide o adiabatický dej, ktorý však uvažujeme len pri väčších bublinách

- bublina je nasýtená plynom s rovnakým parciálnym tlakom ako je tlak sýtych pár okolitej kvapaliny pri danej teplote

- bublina je sférického tvaru

$$p_w - p_\infty + \left(p_0 - p_w + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \cdot \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\kappa} = \rho \cdot \left[R \cdot \frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 \right] + \frac{2\sigma}{R} + 4 \cdot \mu \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dt} \quad (1)$$

p_w – tlak sýtych pár [Pa]

p_∞ – tlak vo veľkej vzdialenosti od bubliny [Pa]

p_0 – počiatkový tlak v bubline [Pa]

σ – povrchové napätie kvapaliny [$N \cdot m^{-1}$]

R_0 – počiatkový polomer bubliny [m]

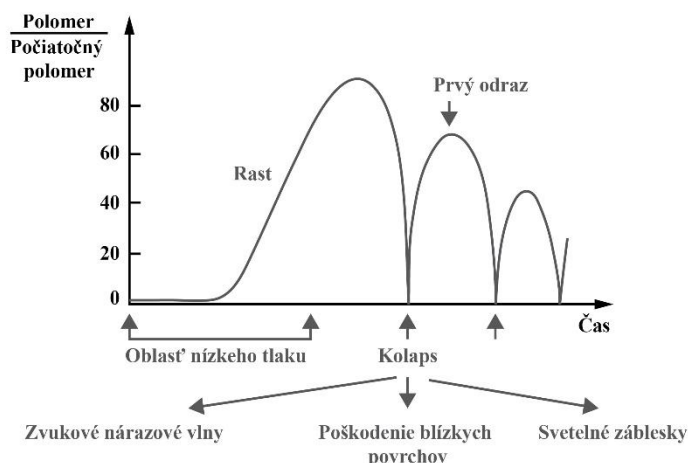
R – polomer závislý na čase [m]

κ – Poissonova konštanta pre plyn v bubline [–]

ρ – hustota kvapaliny [$kg \cdot m^{-3}$]

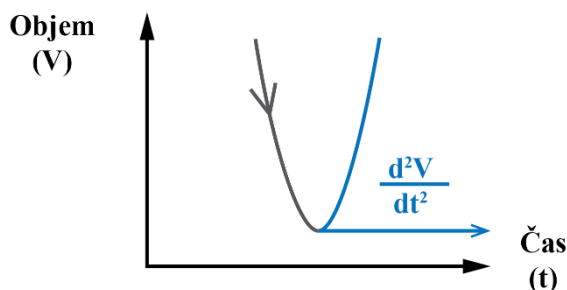
μ – dynamická viskozita kvapaliny [Pa · s]

Pri kolapse bublinky sa bublinka zmenší na oveľa menšiu veľkosť ako na počiatku. Tým pádom stlačuje plynný obsah bublinky za vzniku veľmi vysokého tlaku a vysokej teploty **Obrázok 1-2**. Energia je akumulovaná v bublinke počas jej rastu a pri jej zániku je sústredene uvoľnená na jedno miesto. Vďaka schopnosti sústredenia energie na konkrétne miesto, je kavitácia využívaná v rôznych odvetviach. [3]



Obrázok 1-2 Správanie bublinky podľa Rayleigh-Plessetovej rovnice, upravené podľa [3]

Pri kolapse kavitačného jadra z maximálneho objemu a následnému rastu, môžu pri kompresii plynu vznikáť veľmi vysoké hodnoty druhej derivácie objemu bublinky (Obrázok 1-3).



Obrázok 1-3 Správanie bublinky v poslednej fáze kolapsu, fáza reboundu [3]

Keďže akustický tlak p_a je priamo úmerný tejto druhej derivácii (2),

$$p_a = \frac{\rho}{4\pi R} \frac{d^2V}{dt^2} \quad (2)$$

(kde ρ je hustota kvapaliny, R je vzdialenosť bodu, v ktorom meriame tlak od stredu bublinky) kolaps bublinky je schopný vyžiariť veľký pozitívny tlakový impulz. Veľkosť tohto tlakového impulzu (I) je definovaná ako oblasť pod zmeraným impulzom, teda (3)

$$I = \int_{t_1}^{t_2} p_a dt \quad (3)$$

kde t_1 a t_2 sú časy opisujúce začiatok a koniec daného pulzu. Veľkú časť poškodenia spôsobeného kavitačným javom je možné pripísať následnosti týchto impulzov. [3]

1.1.2 Kavitačné číslo

Pre možnosť kvantitatívneho posúdenia kavitácie bolo zavedené kavitačné číslo. Pri obtekaní telesa nastane premenné rozloženie tlaku okolo povrchu telesa. Tlakový súčiniteľ je definovaný ako rozdiel tlaku p_1 (tlak v určitom mieste obtekaného povrchu) a tlaku p_2 (tlak v mieste kde prúdenie nie je ovplyvnené obtekaním), vzhľadom na dynamický tlak v tomto mieste ($\frac{1}{2}\rho v_1$). A je daný vzťahom (4) [1]

$$c_p = \frac{2(p - p_1)}{\rho v_1^2} \quad (4)$$

Vzťah je získaný na základe Bernoulliho rovnice pre prúdenie neviskózne kvapaliny. Rozdiel tlaku je spôsobený dynamikou prúdu. Na určitom mieste dosahuje tlak najnižšiu hodnotu $p = p_{min}$ za maximálnej rýchlosti v_{max} . V tomto prípade je dosiahnutý minimálny tlakový súčiniteľ (5) [1]

$$c_{p_{min}} = \frac{2(p_{min} - p_1)}{\rho v_1^2} \quad (5)$$

Táto hodnota je závislá na tvare obtekaného telesa. Teoreticky môže tlak p_{min} klesať na ľubovoľnú zápornú hodnotu. Avšak pri obtekaní kvapalinou je hodnota p_{min} obmedzená vznikom kavitácie, ktorá sa objavuje pri znížení tlaku na hodnotu kavitačného tlaku p_{kav} . Zníženie tlaku na kavitačný tlak je možné dosiahnuť pri obtekaní telesa znížením tlaku p_1 alebo zvýšením rýchlosti prúdenia v_1 . [1]

Pri vzniku kavitácie sa predpokladá, že kavitačný tlak je rovný tlaku nasýtených pár pri danej teplote ($p_{kav} = p_w$). V skutočnosti je tento predpoklad len približný. Aby sme charakterizovali tento vzájomný vzťah, zavádzame kavitačný parameter K vzťahom (6), [2]

$$K = \frac{2(p_1 - p_w)}{\rho v_1^2} \quad (6)$$

Akéoľvek prúdenie, či už kavitujúce alebo nie, má určitú hodnotu K . Hodnota K , pri ktorej začne vznikať kavitácia, sa označuje ako kavitačný parameter pre počiatok kavitácie $K_{poč}$. Pre obtekanie telesa bez vzniku kavitácie platí $K > K_{poč}$ a pre obtekanie telesa so vznikom kavitácie platí $K < K_{poč}$. Obmedzenie kavitačného parametra z pohľadu maximálneho prietoku sa nazýva kritický kavitačný parameter K_{kr} .

Kavitačný parameter je možné použiť ako podobnostné číslo pri kavitačnom obtekaní telies (sféra, valec, profily kanálov, apod.). Vznik kavitácie je však podmienený viacerými fyzikálnymi vplyvmi kvapaliny. [1]

1.1.3 Druh prúdenia

Na popísanie typu prúdenia slúži Reynoldsovo číslo (7), ktoré vyjadruje pomer medzi dynamickými silami a smykovými silami,

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (7)$$

Kde ρ je hustota kvapaliny [$kg \cdot m^{-3}$] v predstavuje charakteristickú rýchlosť kvapaliny [$m \cdot s^{-1}$], μ je dynamická viskozita kvapaliny [$Pa \cdot s$], D je charakteristický rozmer [m]. Na základe hodnoty Reynoldsovo čísla je možné určiť o aký typ prúdenia sa jedná.

Pri $Re < 2300$ sa jedná o laminárne prúdenie a pri $Re > 4000$ sa jedná o prúdenie turbulentné. Rozhranie medzi týmito dvoma limitmi je nazývaná prechodné prúdenie alebo kritická zóna. [4]

Pri laminárnom prúdení dochádza ku kavitácii zriedkavejšie, z dôvodu stability tlakových polí a pomalým zmenám tlakov. Preto je vznik kavitačných jadier minimálny. Turbulentné prúdenie je charakteristické chaotickým a nepredpovedateľným výskytom vírov a lokálnych fluktuácií tlaku. V dôsledku týchto poklesov tlaku vo vzniknutých víroch je pravdepodobnosť kavitácie vyššia. [5]

1.2 Vplyv fyzikálnych vlastností kvapaliny na kavitáciu

V skutočnosti sa pri chode hydraulických strojov vyskytuje veľké množstvo bubliniek a vyskytujú sa v blízkosti iných telies, čo značne ovplyvňuje správanie jednotlivých bubliniek. Tlakové pole je ovplyvňované a tlaky v jednotlivých miestach môžu nadobudnúť veľké rozdiely. Pôsobenie rôznych vplyvov ako sú napríklad teplotné rozdiely, prenos hmoty fázovým rozhraním, nečistoty v kvapaline a mnohé iné značne ovplyvňujú rast a správanie bubliniek.[6]

1.2.1 Vplyv povrchového napätia, viskozity a obsahu vzduchu

Na základe predpokladu, že pri zmene veľkosti bubliny sa nemení hmotnosť plynu (nedochádza k difúzii plynu z okolitej kvapaliny) a dej sa odohráva za konštantnej teploty, je možné definovať vzťah (8) popisujúci tlak kvapaliny ktorá obklopuje bublinu p_k , [1]

$$p_k = p_w + \left(p_{k0} - p_w + \frac{2\sigma}{r_{B0}} \right) \left(\frac{r_{B0}}{r_B} \right)^3 - \frac{2\sigma}{r_B} \quad (8)$$

Kde: p_w – tlak nasýtených pár [Pa]

p_k – tlak kvapaliny obklopujúcej bublinu [Pa]

σ – povrchové napätie [$N \cdot m^{-1}$]

r_B – polomer sférickej bubliny [m]

index 0 značí počiatočný stav hodnôt

Experimentálne bolo dokázané, že pri zvýšení povrchového napätia σ sa hodnota kavitačného tlaku znižuje. Z fyzikálneho hľadiska dochádza pri zvýšení povrchového napätia k spomaľovaniu rastu

kavitačnej bublinky, ale zároveň k urýchleniu jej zániku. K zníženiu pevnosti kvapaliny prispieva zvýšený počet kavitačných bublín. [1]

1.2.2 Vplyv viskozity kvapaliny

Do tohto momentu sme predpokladali, že sa jedná o stacionárne prúdenie neviskózne kvapaliny. Za týchto predpokladov je minimálny tlakový súčiniteľ $C_{p_{min}}$ kladná konštanta pre danú geometriu. Avšak, ak zohľadníme vplyv viskozity kvapaliny, $C_{p_{min}}$ bude funkciou Reynoldsovoho čísla a dokonca aj v stacionárnom prúdení vzniká závislosť (kavitačného parametru pre počiatok kavitácie) $K_{poč}$ na Reynoldsovom čísle. Vznik vírov je podmienený nie len prirodzeným výskytom v turbulentnom prúdení, ale aj voľným a núteným odtrhávaním vírov. Tento jav má významný vplyv na vznik kavitácie, pretože tlak v strede víru môže byť nižší ako stredný tlak toku. Čo znamená, že pri výpočte minimálneho tlakového súčiniteľa $C_{p_{min}}$ je braný do úvahy najnižší stredný tlak. Kavitácia však môže nastať už v prechodnom víre, ktorého stredný tlak je omnoho menší.[2]

1.2.3 Vplyv nerozpusteného vzduchu v kvapaline

Za prítomnosti väčších vzduchových bublín (väčšie kavitačné jadrá) sa kavitačný tlak zväčšuje, takže expanzívny rast bubliny môže nastať už pri $p_{kr} > p_w$. S obsahom vzduchu v kvapaline rastie počiatkový parameter pre počiatok kavitácie $K_{poč}$. Pri relatívne pomalej zmene tlaku kvapaliny v okolí bubliny, môže dôjsť k značnému nárastu bubliny, v dôsledku difúzie plynu z okolitej kvapaliny. Difúzia je podmienená vzťahom (9). K difúzii teda dôjde pri presýtení kvapaliny vzduchom.

$$\frac{\alpha}{\alpha_n} > 1 \quad (9)$$

Kde : - α je pomer objemu vzduchu k objemu kvapaliny [-]

- α_n je pomer objemu vzduchu rozpustenom v kvapaline pri nasýtenom stave k objemu kvapaliny [-]

Voľný nerozpustený vzduch tvorí v kvapaline dvojfázovú zmes, prípadne zmes pár a kvapaliny, ktorá sa chová ako stlačiteľné prostredie. Stlačiteľnosť zmesi a teda obsah nerozpusteného vzduchu v kvapaline, značne ovplyvňuje rýchlosť zvuku (rýchlosť šírenia tlakových impulzov) $a_s = \sqrt{dp/d\rho}$. Preto aj malé množstvo nerozpustenej plynnej zložky v kvapaline, spôsobí prudký pokles rýchlosti zvuku. [1]

1.2.4 Vplyv teploty na kavitáciu

Experimentálne výsledky dokazujú, že pri vyššej teplote kvapaliny sa kavitačné vlastnosti zhoršujú. Pri vzniku bublinky predpokladáme, že kavitačný tlak v kavitačnej oblasti je tlak sýtych pár p_w pri danej teplote kvapaliny v okolí kavitačnej oblasti. V tomto mieste dochádza k vyparovaniu a teplo je získané z povrchovej vrstvy fázového rozhrania. Ochladenie blízkeho

okolía bublinky, spôsobí zmenu hodnoty tlaku nasýtených pár v danej oblasti. [1] Naopak pri kolapse je obsah bublinky stlačovaný, para kondenzuje a teplo sa uvoľňuje. V okolí kvapaliny teplota narastie, čo spôsobí zvýšenie tlaku v bublinke, čo následne zníži rýchlosť zmenšovania bublinky. [2]

1.3 Zánik bublinky

Kolaps bublinky je jedným z veľmi dôležitých súčastí kavitácie. Hlavnou skúmanou oblasťou zániku kavitačnej bublinky sú negatívne vplyvy spôsobené veľkými rýchlosťami prúdenia, tlakovými alebo termodynamickými vplyvmi. V kapitole 1.1.1 sme popisovali dynamiku bublinky na základe Rayleigh-Plessetovej rovnice, za pomoci ktorej sme boli schopní určiť približnú veľkosť daných veličín. Rayleigh-Plessetová rovnica je definovaná na základe zanedbania niektorých vplyvov a určenia mnohých predpokladov, vrátane predpokladu že sa jedná o sférickú bublinku. Avšak tvar zanikajúcich bubliniek v praxi nie je vždy sférický. Analýza sférickej bublinky reprezentuje maximálne možné následky kolapsu bublinky popisujúce vzniknutý tlak, teplo, hluk alebo mechanické poškodenie. Preto je aj najčastejším experimentálnym modelom kavitácie. [2]

Zánik bublinky je možné rozdeliť na dva dôležité deje:

- asymptotická forma kolapsu, ktorá nastáva ešte pred výrazným stlačením plynnej fáze
- odraz a spätný rast kavitačného jadra, pri ktorom zrýchlenie mení znamienko a nadobúda vysokých pozitívnych hodnôt

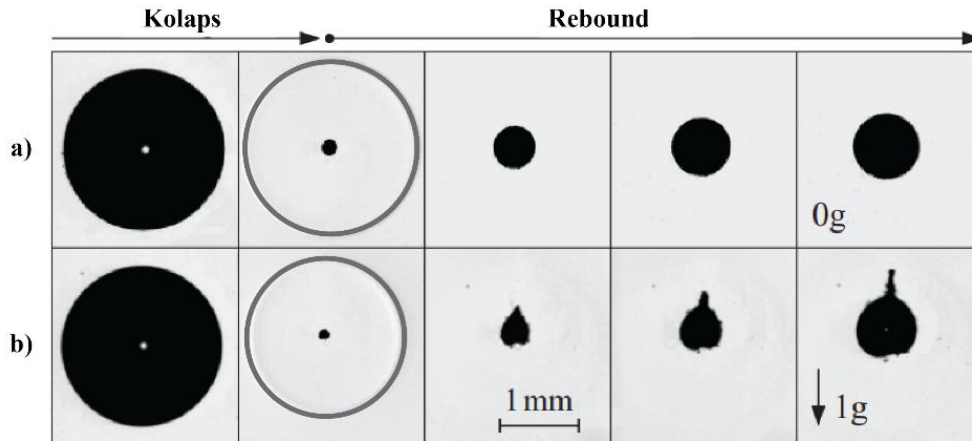
Pri spätnom odraze „rebound“ je bublinka náchylnejšia k nesférickým poruchám. Táto nestabilita sa prejavuje rôznymi spôsobmi, podmienenými intenzitou kolapsu alebo prítomnosťou ohraničenia kavitačnej oblasti. Všetky bublinky, ktoré kolabujú na veľkosť rádovo menšiu ako maximálna veľkosť bublinky, následne vystúpia z oblasti kolapsu ako zhuk menších bubliniek. Pôvodom tejto oblasti je najčastejšie vznik vysokorýchlostného prúdu nazývaného aj „jetting“. Dôvodom vzniku tohto prúdenia je určitá asymetria bublinky, spôsobená výskytom blízkeho pevného telesa, či prekážky, napr. steny. [2]

Tomuto javu sa budeme bližšie venovať v nasledujúcej kapitole.

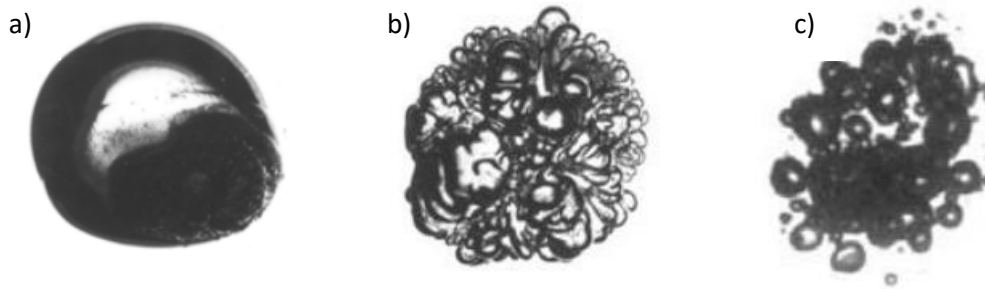
1.3.1 Symetrický prípad kolapsu kavitačnej bublinky

Pri symetrickom kolapse bubliny v blízkosti pevného telesa, dochádza k tvorbe tlakovej vlny a *reboundu* bublinky, ktoré následne spôsobujú narušenie povrchu. Dynamika tohto procesu je charakteristická rýchlym zmenšením veľkosti bublinky, sprevádzaný vysokým tlakom a vysokou teplotou v mieste kolapsu. Vo výskume [7] boli skúmane vlastnosti zanikajúcej symetrickej bublinky, vytvorenej laserovým lúčom. Tento dej je závislý na veľkom množstve premenných. Pôsobenia gravitácie, teplotných rozdielov a prenosov, fyzikálnych vlastností kvapaliny a mnohých iných. Z tohto výskumu vyplýva, že ku nestabilite povrchu sférickej bublinky môže dôjsť už pri nepatrných pôsobeniach vonkajších síl. Článok skúma rozdelenie energie vzniknutej z kolapsu medzi tlakovú vlnu a *reboundom* bublinky.[7] V realite nie je tvar bublinky po *rebounde* sférický, je deformovaný a povrch je zvlnený. **Obrazok 1-4** popisuje správanie úplne symetrickej sférickej bublinky a jemne deformovanej bublinky pri kolapse a následnom odraze. Pri zániku

bublinky môže nastať situácia, kedy sa bublinka rozpadne na zhluk viacerých menších bubliniek. Tento jav pozorovali (Frost a Sturtevant) **Obrázok 1-5**, v experimente pri pozorovaní bublinky v glyceríne. Bublinka a) popisuje stav pred kolapsom, b) po prvom kolapse a rebounde, c) znázorňuje zhluk bubliniek zapríčinený opätovnými kolapsmi. [2]



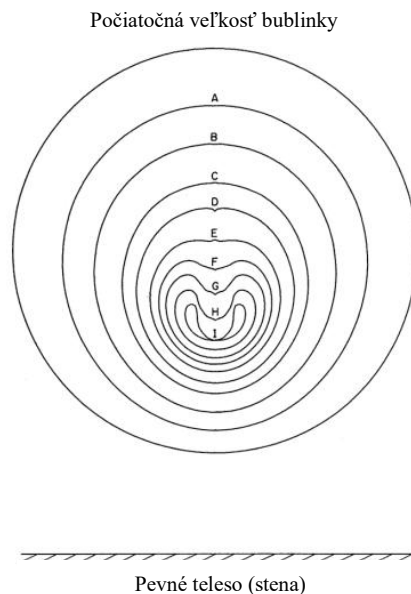
Obrázok 1-4 Správanie sférickej bublinky pri kolapse a rebounde, a) bez vplyvu gravitačného poľa, b) v gravitačnom poli [7]



Obrázok 1-5 Chovanie kavitujúcej bublinky - symetrický prípad [2]

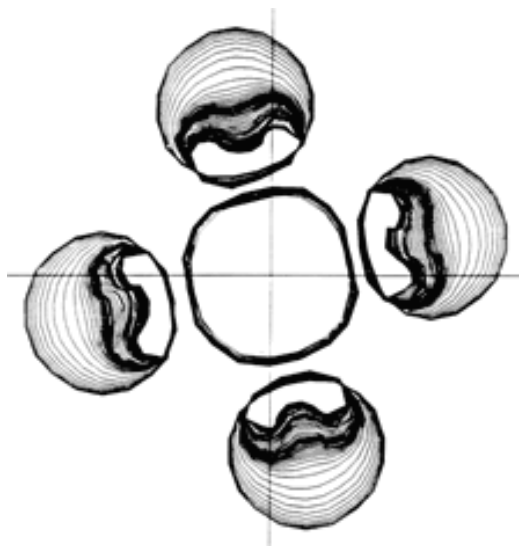
1.3.2 Asymetrický prípad kolapsu kavitačnej bublinky

Pri raste bublinky v blízkosti pevnej steny, dochádza v dôsledku zväčšovania jej objemu k pohybu okolitej kvapaliny. To spôsobuje vznik rozdielného rozloženia okolitého tlakového poľa. V blízkosti steny tlak klesá. Pri kolapse nastáva deformácia na odvrátenej strane bublinky, čo spôsobí vniknutie tekutiny do vnútra bublinky vo forme vysokorýchlostného prúdu, nazývaného aj „microjet“. [8] Na **Obrázok 1-6** je vykreslený vývoj *microjetu* v rôznych štádiách kolapsu. *Jet* pokračuje v smere vzniku, následne pretína náprotivnú stranu bublinky, no môže sa ešte naďalej predlžovať. [9]



Obrázok 1-6 Vývoj kolapsu bublinky v blízkosti pevného telesa (Plesset a Chapman) [8]

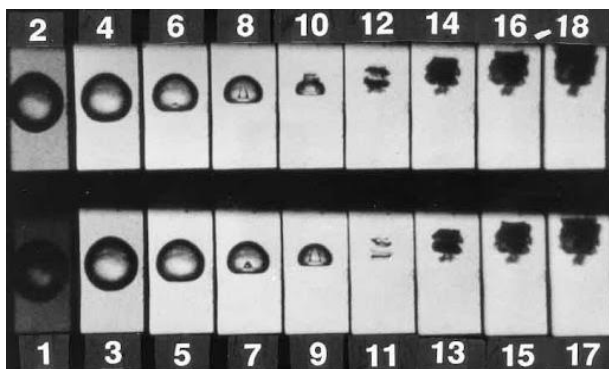
Ak sa bublinka nachádza v prítomnosti iných telies než je pevná stena, jej chovanie je takisto ovplyvňované ich existenciou na základe vzájomných interakcií. Tento jav je možné pozorovať v prípadoch ako sú napríklad susediace bublinky v prípade kavitačného oblaku. Bublinky na vonkajšom okraji oblaku majú tendenciu *jettingu* smerom k stredu daného zhluku bubliniek. [10] Výskum, ktorý vypracovali (Chahine a Duraiswami)[11], ponúka numerické riešenie pre výpočet a definíciu správania skupiny bubliniek pri zániku. Výsledné správanie je možné vyobraziť pomocou **Obrázok 1-7**. [2]



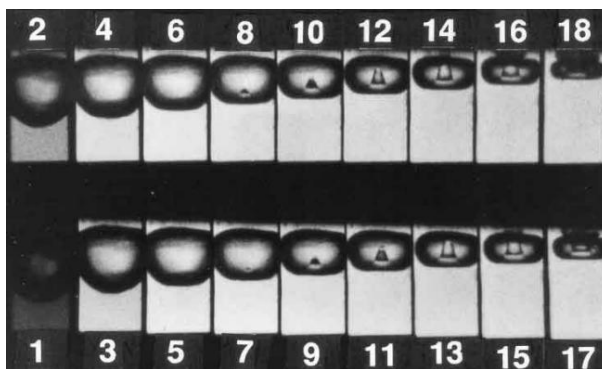
Obrázok 1-7 Numerický výpočet kolapsu skupiny 5 bublín (Chahine Duraiswami) [2]

Ďalším významným parametrom ovplyvňujúcim dynamiku *microjetu*, je vzdialenosť počiatkovej polohy bublinky od pevného telesa, vzhľadom na maximálny polomer bublinky. [9] Vo výskume,

ktorý spracoval (Tomita a Shima)[12], bolo skúmané správanie bublinky z ohľadom na vzdialenosť zanikajúcej bublinky od pevného telesa. [2]



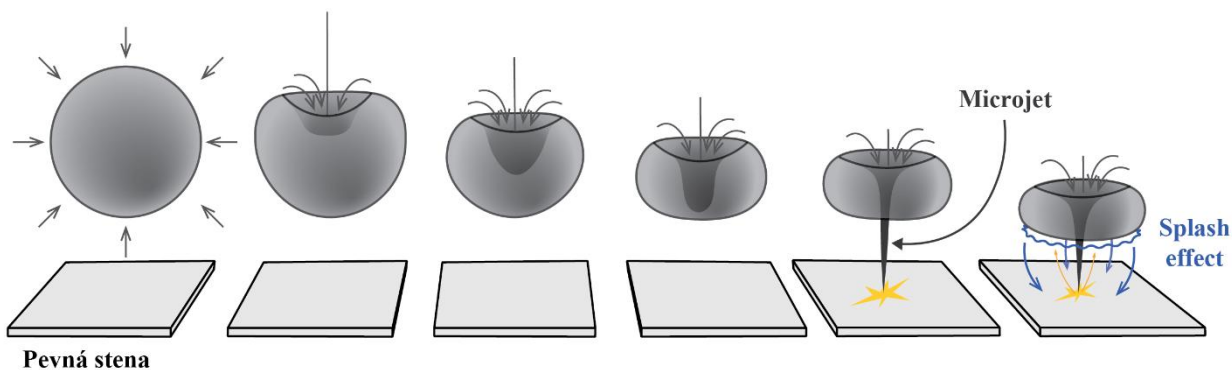
Obrázok 1-8 Časový vývoj microjetu, pri kolapse bublinky s väčším odstupom od steny [2]



Obrázok 1-9 Časový vývoj microjetu, pri kolapse bublinky vo veľmi veľkej blízkosti steny [2]

Experiment disponuje sériou fotografií, ktoré zachytávajú kolaps bublinky v rozmedzí $2 \mu\text{s}$ a vyobrazujú vplyv vzdialenosti počiatkovej polohy bublinky. **Obrázok 1-8** znázorňuje vznik *jetu* a následné rozdelenie počiatkovej bublinky na dva prstencové vírové bublinky (snímka č.11) a finálny kavitačný oblak. **Obrázok 1-9** znázorňuje tvorbu *jetu*, ktorý prerazením bublinky narazí až na stenu. [2]

Pri náraze *microjetu* na pevný povrch vzniká zároveň fenomén nazývaný „splash effect“. Krátkodobý vznik *splash efektu* je takisto závislý na veľkosti oblasti medzi bublinou a pevnou stenou. Pri prechode vysokorýchlostného prúdu kvapalinou a následnom dopade na povrch, vzniká radiálne prúdenie. Toto prúdenie pri kontakte s povrchom zmenšujúcej sa bublinky vytvorí daný *splash effect*. Tento jav vytvára zmeny v prúdovom poli spolu so vznikom nárazového rozhrania vytvoreného stretom *microjetu* a povrchu bublinky. To vedie k vzniku vysokých prechodných tlakov a k transformácii bublinky do „hríbového tvaru“. [9] Tento jav a jeho vývoj je možné popísať pomocou **Obrázok 1-10**.



Obrázok 1-10 Vznik microjetu a splash efektu pri zániku bublinky blízko pevnej steny, zdroj: autor

2 Energy harvesting

Energy harvesting je proces získavania prebytočnej alebo potenciálne nevyužitej energie, jej následné uskladnenie a finálne využitie pre malé autonómne zariadenia či bezdrôtové senzory. S rastúcou cenou energií a ubúdajúcimi zásobami tradičných zdrojov energie, je čoraz viac kladený dôraz na získavanie energie z obnoviteľných zdrojov v akejkoľvek miere. Získavanie obnoviteľnej energie z okolitého prostredia, aj keď vo veľmi malých množstvách, dokáže zabezpečiť autonómny chod malého zariadenia, napr. senzoru, aj na zle dostupných miestach. Najčastejšími zdrojmi sú napr. veterná, solárna, termálna či kinetická energia.

2.1 Spôsoby energy harvesting

Solárna energia je jedna z celosvetovo najčastejšie využívaných zdrojov pre energy harvesting. Dopyt po využívaní solárnej energie, ako zdroja „zelenej“ energie v poslednej dobe výrazne stúpol. Či už kvôli širokej dostupnosti, nákladom alebo efektívnosti v porovnaní s inými technológiami. Väčšinou sú založené na fotovoltaiických, fotochemických alebo fototermálnych procesoch. V dnešnej dobe sú už často používané aj v domácnostiach ako doplnkový zdroj elektrickej energie.[13]

Termálna energia môže byť napríklad spracovávaná za pomoci termoelektrického javu, ktorý spočíva v difúzii nositeľov náboja z oblasti s vyššou teplotou do oblasti s nižšou teplotou. Tento jav nazývaný aj Seebeckov jav popisuje vznik napätia, ktorý nastáva pri teplotných rozdieloch medzi dvoma rozdielnymi kovmi alebo polovodičmi. Najčastejšie využívaným zariadením pre energy harvesting termálnej energie je termočlánok, ktorý je založený na princípe Seebeckovho javu.[14]

Kinetická energia je najčastejšie prezentovaná vo forme vibrácií, náhlych posunov alebo síl a je prevádzaná na elektrickú energiu za pomoci elektromagnetických, elektrostatických alebo piezoelektrických mechanizmov. Vhodné vibrácie je možné pozorovať v mnohých aplikáciách, vrátane bežných domácich zariadení, automobiloch, lietadlách, budovách alebo mostoch. Aplikácie založené na ľudskom pohybe sa vyznačujú nízkofrekvenčnými, vysoko amplitúdovými posuvmi. Množstvo energie generované týmto prístupom závisí predovšetkým na množstve a forme kinetickej energie a účinnosti generátora a elektronických komponent použitých na konverziu energie. [15]

3 Piezoelektrický jav

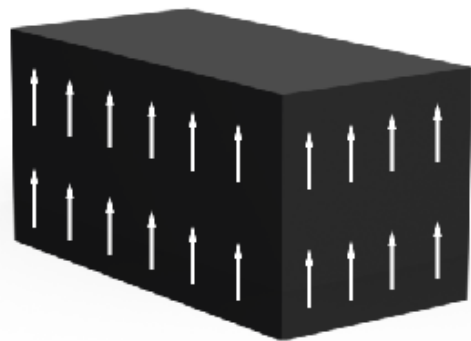
Piezoelektrický jav je používaný na prevod mechanickej energie na elektrický prúd. Vystavenie materiálu objemovej zmene spôsobí preorientovanie elektrického dipólu kryštalickej mriežky. Ako odpoveď na množstvo použitej mechanickej energie vzniká zmena elektrického potenciálu. Množstvo vyprodukovaného náboja je proporcionálne k použitej sile, ktorá je definovaná ako súčin seizmickej hmotnosti a vstupného zrýchlenia. Táto vlastnosť je kľúčová pre rôzne senzory, snímače alebo tzv. „energy harvestre“.[16]

3.1 Princíp piezoelektrického javu

Piezoelektrický jav premieňa mechanické napätie na elektrický prúd alebo napätie a je založený na základných vlastnostiach kryštalickej mriežky. Určité kryštalické štruktúry majú pozitívnu a negatívnu polaritu náboja, ktoré sa neutralizujú pozdĺž pomyselných polárnych osí. Ak je táto rovnováha narušená vonkajším silovým pôsobením na kryštalickú mriežku, začnú vznikať náboje na povrchu kryštálu. Vzniknuté napätie je priamoúmerné pôsobiacej sile a to umožňuje piezoelektrickým materiálom účinne premieňať mechanickú energiu na elektrickú. Typicky sa tento elektrický výstup prejavuje ako striedavý prúd (AC), čo umožňuje rôznorodosť použití, napr. pre snímače vibrácií, prevodníky a iné. [16]

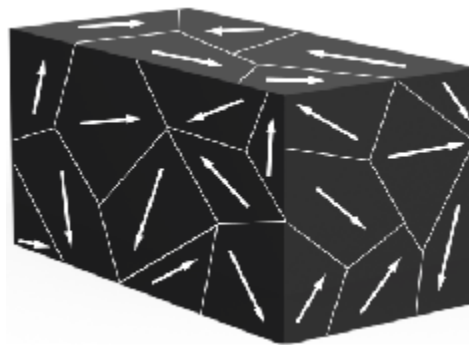
Symetria kryštálovej mriežky je úzko spätá so schopnosťou materiálu vykonávať piezoelektrický jav, ktorý môže vzniknúť len v prípade že mriežka nemá stred symetrie. Tento vzťah je možné popísať na základe monokryštalickej a polykryštalickej štruktúry. [17]

Polárne osi všetkých nosičov náboja monokryštalickej štruktúry **Obrázok 3-1**, ukazujú jedným smerom. Táto štruktúra reprezentuje symetriu vzhľadom na smer všetkých polárnych osí, ktorých smer by sa nezmenil ani po rozdelení kryštalickej štruktúry na časti. [16]



Obrázok 3-1 – Monokryštalická štruktúra [16]

Polykryštál **Obrázok 3-2** je charakterizovaný oblasťami s rôznym smerom polárnych osí, teda asymetrickým rozdelením. Teda nie je možné rozdeliť kryštál na dve alebo viaceré časti s rovnakým smerom polarizácie. Pre dosiahnutie piezoelektrických vlastností je polykryštál ohrievaný až do Curieho teploty za pôsobenia silného elektrického poľa. Teplota zabezpečí voľný pohyb molekúl a elektrické pole usporiadanie dipólov štruktúry v smere elektrického poľa. Tento dej nazývame polarizácia **Obrázok 3-3**. [16]



Obrázok 3-2 Polykryštalická štruktúra [16]



Obrázok 3-3 Polarizácia [16]

3.2 Elektrostrikticia

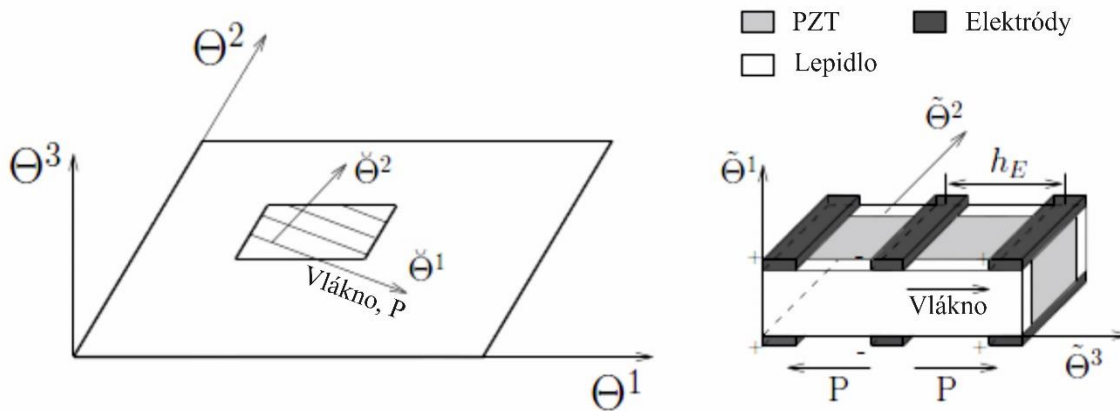
„Opačný“ piezoelektrický jav, nazývaný aj elektrostrikticia, je dej pri ktorom vonkajšie elektrické pole spôsobuje mechanické deformácie kryštálu. Štruktúra kryštálu osciluje medzi stlačením a roztiahnutím s ohľadom na elektrické pole. Premieňa teda elektrickú energiu na vibrácie. Tento efekt je často využívaný pre rôzne aplikácie ako napríklad aktuátory, ktoré fungujú na základe premeny elektrického signálu na presné mechanické pohyby. [17]

3.3 MFC (Macro Fiber Composite)

MFC vynašla v roku 1999 NASA a od roku 2002 je uvedená na trh spoločnosťou Smart Material ktorá je oficiálnym distribútorom a výrobcom NASA. Tento materiál vyniká vysokým výkonom, variabilitou a jednoduchosťou použitia. [18] Najčastejšie používaným materiálom v MFC je PZT (piezoelectric lead zirconate titanate) pre svoje prirodzené piezoelektrické vlastnosti, spôsoby syntézy alebo jednoduché úpravy fyzikálnych vlastností [19]. MFC piezoelektrické aktuátory a senzory sú tvorené vrstvením lepidla, elektród, polyamidového filmu a aktívnej vrstvy, ktorá sa skladá z obdĺžnikovej piezoelektrickej tyče s integrovanými elektródami. Vďaka rôznej polarizácii piezoelektrických tyčí, rozdeľujeme MFC na dva typy.

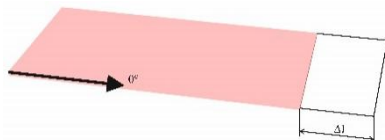
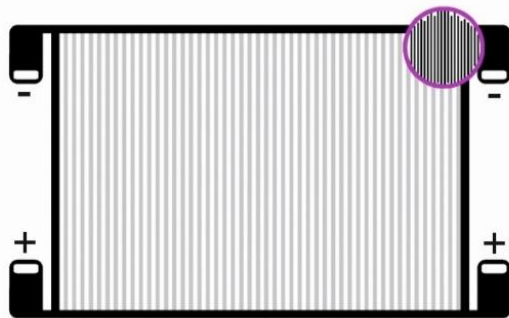
MFC-d33 - polarizácia kryštalickej mriežky je orientovaná rovnobežne so smerom vlákien
Obrázok 3-4

- rozdeľujú sa na 2 typy (P1, F1), vzhľadom na orientáciu vlákien a elektród
- používané často ako senzory pnutia
- maximálne predĺženie $1800\text{ppm}=0,18\%$ pri maximálnom napätí(-500V - 1500V)

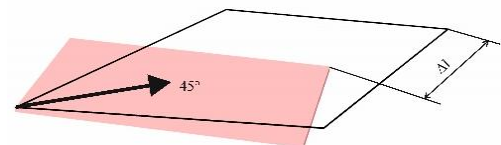


Obrázok 3-4 Skladba MFC-d33, upravené podľa [28]

a)

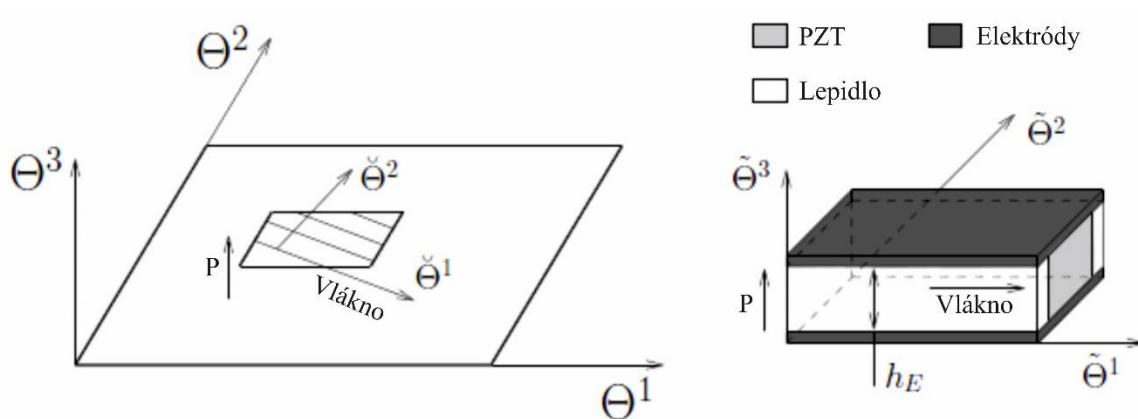


b)

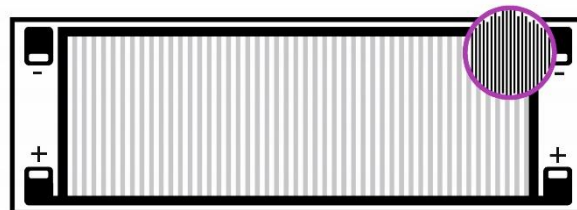


Obrázok 3-5 Rozvrhnutie elektród MFC-d33 pre a) predĺženie (P1), b) krútiaci pohyb (F1), a smer namáhania MFC pri predĺžení a krútení, upravené podľa [18]

- MFC-d31** - polarizácia kryštalickej mriežky je kolmá na smer vlákien **Obrázok 3-6**
- najčastejšie používané pre energy harvesting
 - rozdeľujú sa na 2 typy (P2,P3)
 - P2 sa používa najčastejšie v predpripravenom konzolovom tvare pre energy harvesting
 - P3 je tvorený veľmi širokými vláknami čo spôsobuje zhoršenú ohybnosť



Obrázok 3-6 – Skladba MFC-d31, upravené podľa [28]



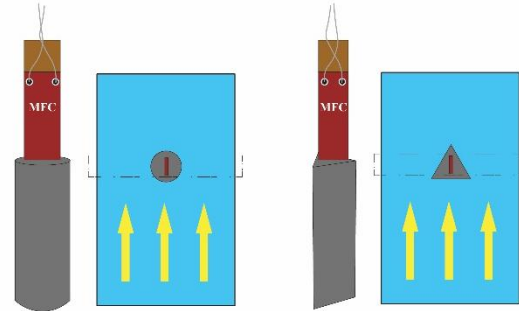
Obrázok 3-7 - Rozvrhnutie elektród pre MFC-d31, upravené podľa [28]

3.4 Spôsoby použitia MFC pri energy harvesting

MFC piezoelektrické aktuátory a senzory sú veľmi častou súčasťou pri skúmaní energy harvesting v rôznych prostrediach, a keďže sa táto práca zameriava na využitie v kvapaline, definujeme niekoľko spôsobov harvestingu v kvapalnom prostredí.

Vortex-Induced Vibration (VIV)

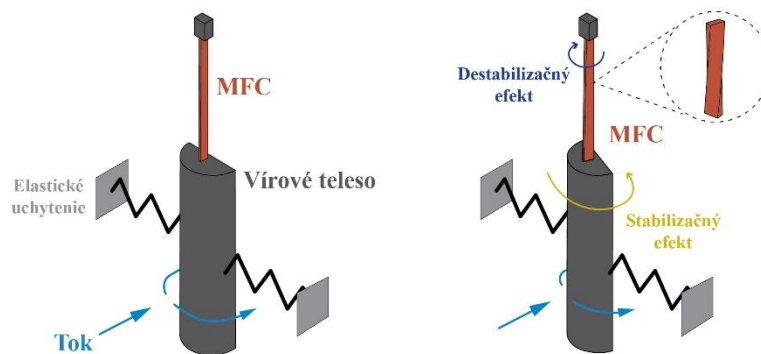
Tento spôsob harvestingu funguje na princípe obtekania tuhého telesa (bluff body) kvapalinou a následnom vzniku vírov, ktoré slúžia ako iniciátori kinetickej energie.[20] Víry vznikajúce pri obtekaní telesa **Obrázok 3-8**, sa periodicky odtrhávajú z oboch strán, čím vytvárajú dynamickú silu pôsobiacu na teleso. Na základe tvaru pevného telesa je možné značne ovplyvniť vznik, frekvenciu a iné správanie vírov. Tento jav je vo všeobecnosti ovplyvňovaný mnohými parametrami, ako je napríklad Reynoldsovo číslo, Strouhalovo číslo, materiálová pevnosť alebo koeficient tlmenia. [21]



Obrázok 3-8 – Spôsob upevnenia MFC a budenia pre VIV, [21]

Galloping Mode

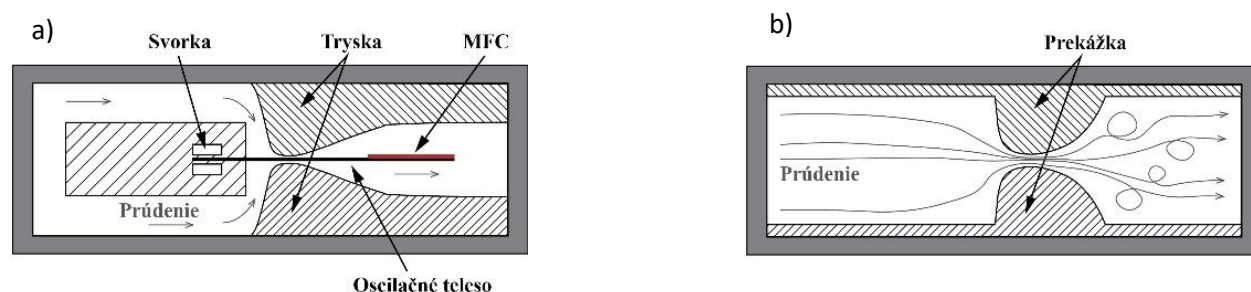
Tento jav je typický samovoľným vznikom vibrácií, pri strete nestabilného, nelineárneho budenia a pevného telesa s vysokofrekvenčným odtrhávaním vírov. Na rozdiel od VIV, galloping nie je limitovaný polohovým maximom. Výsledkom je sústredené pôsobenie sily, až do dosiahnutia kritickej hodnoty, ktorá môže viesť až ku katastrofálnym následkom. Keďže galloping effect je charakteristický nízkymi frekvenciami a vysokou amplitúdou kmitania, je naozaj vhodný pre energy harvesting.[21] Galloping funguje na princípe stabilizácie telesa a destabilizačného efektu ktorý vzniká prúdením kvapaliny okolo pevného telesa. MFC je pripevnené k telesu a prenášané vibrácie a deformácie slúžia ako zdroj energie. **Obrázok 3-9** [20]



Obrázok 3-9 Princíp mechanizmu používanom pre gallopingu, upravené podľa [22]

Turbulence-Induced Vibration (TIV)

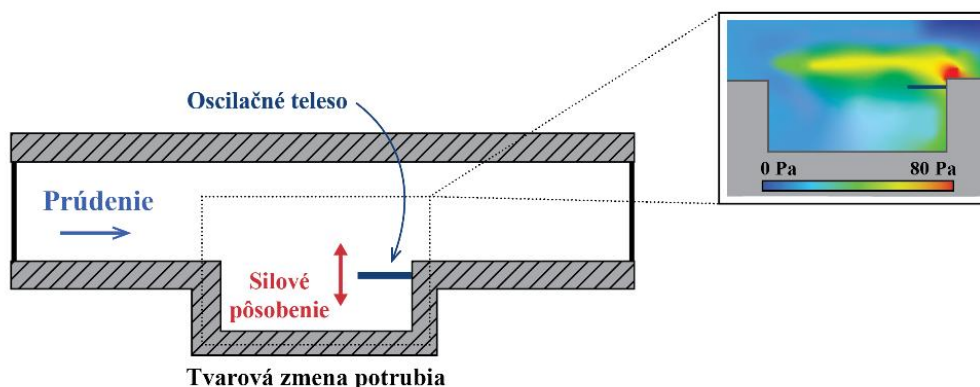
Turbulentné prúdenie kvapaliny pôsobí ako excitačný mechanizmus. V turbulentnom prúdení sa na určitých miestach v kvapaline náhle mení rýchlosť a smer prúdenia. Táto turbulencia vytvára kolísavú silu pôsobiacu na oscilujúce teleso ku ktorému je pripojené MFC. Na vytvorenie turbulencie je najčastejšie používaný tvarový prvok (dýza) alebo prekážka (clona), **Obrázok 3-10**. Pri TIV vznikajú frekvencie v rozmedzí 10-160Hz. V porovnaní s ostatnými druhmi budenia je TIV oveľa komplexnejšie, náročnejšie na vizualizáciu, stanovenie predpokladov alebo optimalizáciu. [22]



Obrázok 3-10 Princíp mechanizmu TIV pri použití a) trysky, b) prekážky, upravené podľa [22]

Cavity-Flow-Induced Vibration (CFIV)

CFIV popisuje vznik vírov za pomoci tvarovej zmeny v potrubí. Prúdenie iniciuje tvorbu vírov na počiatku tvarovej zmeny a presun po smere prúdenia, kde je v určitej vzdialenosti umiestnené oscilačné teleso. **Obrázok 3-11** Vzniknutá vysokotlaková oblasť vytvára tlakové vlny ktoré rozkmitajú oscilačné teleso. Z daného experimentu boli získané hodnoty oscilačnej frekvencie 228Hz pri rýchlosti prúdenia 30m/s. [22]

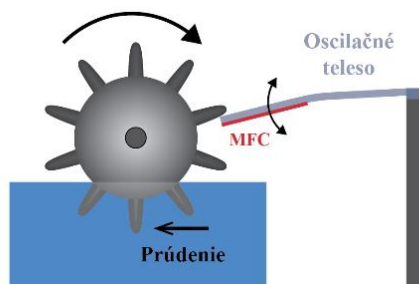


Obrázok 3-11 Princíp mechanizmu a rozdelenie tlaku pri CIV, upravené podľa [22]

Blocking

Blocking je spôsob získavania energie z priamej interakcie prúdenia a MFC filmu, ktorý je uchytený na pružnom telese. Tento typ harvestingu je založený na princípe stretu dvoch telies, excitačného telesa ktoré je budené prúdením a telesa oscilačného s nalepeným MFC filmom

Obrázok 3-12. Pri tomto type experimentu boli namerané hodnoty oscilačnej frekvencie 20Hz pre prúdenie 7,5l/min. [22]



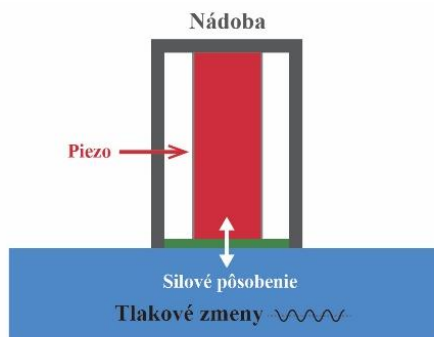
Obrázok 3-12 – Princíp fungovania Blockingu, upravené podľa [22]

Hydraulic pressure energy harvesting (EPEH)

Tento prístup premieňa tlakové pulzácie v kvapaline na elektrickú energiu za pomoci piezoelektrického členu, ktorý je najčastejšie zostavený z vrstvenia piezoelektrickej keramiky. Tieto vrstvy zaisťujú vysokú tuhosť v axiálnom smere zaťaženia, čo im umožňuje odolávať relatívne vysokým tlakom až do 40MPa.

Tento článok je umiestnený na pružnej membráne prenášajúcej tlakové zmeny medzi kvapalinou a piezom

Obrázok 3-13. [23]



Obrázok 3-13 – Typické prevedenie HPEH energy harvestoru, upravené podľa [23]

4 Experimentálna časť

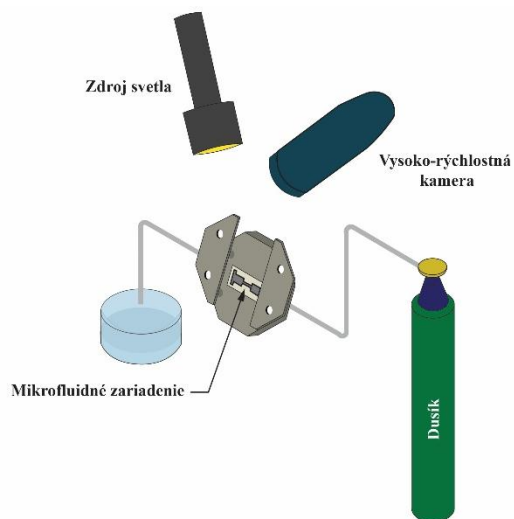
Táto kapitola sa zameriava na experimentálne overenie možnosti získavania elektrickej energie z kavitácie, za pomoci piezoelektrického snímača (*patchu*). Cieľom experimentu je zhodnotiť efektívnosť generovania elektrického výkonu a určiť ideálne prevedenie v rozsahu tejto práce.

Kavitácia, ako zdroj energie, bola skúmaná v experimente [24] vzhľadom na teplotný gradient vznikajúci pri zániku bublinky. V tomto experimente sa autori zameriavali na vznik teplotného gradientu v micro-potrubiach. Z experimentu je zjavné, že pri zániku bublinky sa uvoľňuje veľké množstvo energie, či už v podobe lokalizovaných, vysoko amplitúdových tlakových vln a vysokorýchlostných prúdov alebo rýchleho, lokálnemu zvýšeniu teploty. Tento teplotný gradient bol využitý ako zdroj energie, za pomoci termočlánku **Obrázok 4-1**. Z experimentu vyplýva, že teplotný rozdiel vznikajúci pri zániku kavitáčnej bubliny, je možné využiť ako potenciálny zdroj energie pre malé elektronické zariadenia.

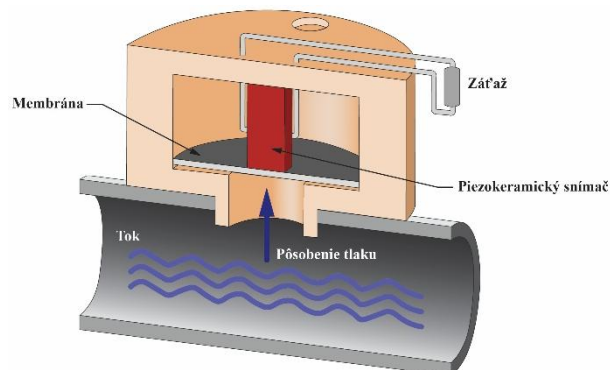
Z výskumu [25], v ktorom sa autori zameriavali na získavanie energie z prúdenia vody za pomoci PZT piezoelektrickej konzoly, umiestnenej v prúdiacej kvapaline. Na zber energie bol použité FEV (flow energy harvesting) technológie, pri ktorých je piezoelektrická konzola uchytená na jednom konci a druhý koniec je excitovaný za pomoci prúdenia kvapaliny **Obrázok 4-3**. V tomto experimente autori dokázali generovať pri prúde 3,8 L/min 3,5mW energie. Experiment poukazuje na možnosť získavania nezanedbateľného množstva energie, za pomoci využívania pieza a prúdiacej kvapaliny.

V práci [23] sa zaoberali energy harvestingom z hydraulických tlakových vln, tzv. Hydraulic Pressure Energy Harvesting (HPEH). Tento prístup premieňa tlakové pulzy vznikajúce pri akejkoľvek cyklickej alebo náhlej zmene tlaku. Tieto pulzy sú v kvapaline premenené na elektrickú energiu za pomoci pevného piezo-keramického telesa, ktorého „deformácia“ vzniká interakciou medzi deliacou membránou a kvapalinou **Obrázok 4-2**. V tejto štúdií boli autori schopní namodelovať priebeh napätia pri rôznych statických tlakoch a následne modifikovať prevedenie experimentu pre zvýšenie výkonu. Z experimentu boli namerané hodnoty generovanej energie $\approx 40\mu\text{W}$ pri pôsobení tlaku $P_s = 4\text{MPa}$.

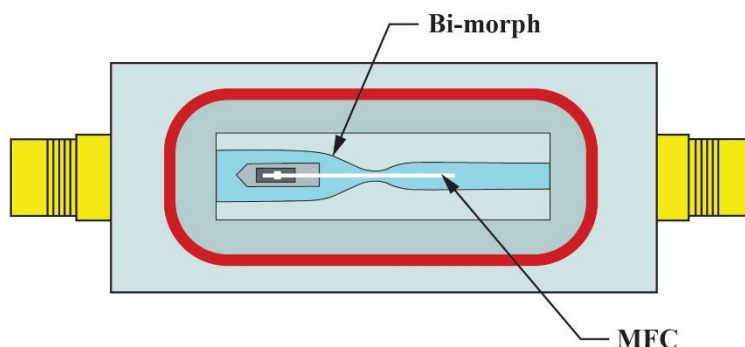
Na základe týchto poznání a s odkazmi na dané experimenty, sme schopní zostaviť štúdiu, v ktorej budeme skúmať kavitáciu ako zdroj energie za pomoci MFC.



Obrázok 4-1 – Experimentálna zostava pre energy harvesting za pomoci teplotného gradientu, upravené podľa [24]



Obrázok 4-2 – Experimentálne prevedenie HPEH, upravené podľa [23]



Obrázok 4-3 – Zostava FEV harvestoru, upravené podľa [25]

4.1 Ciele experimentu

- Generovanie kavitácie v hydraulickom systéme za pomoci clony
- Návrh a konštrukcia dopadovej komponenty s MFC filmom
- Analýza ideálnych vstupných parametrov ovplyvňujúcich kavitáciu (prietok, odpor a konfigurácia osciloskopu)
- Vyhodnotenie energetického potenciálu MFC filmu ako zdroja energie z kavitácie

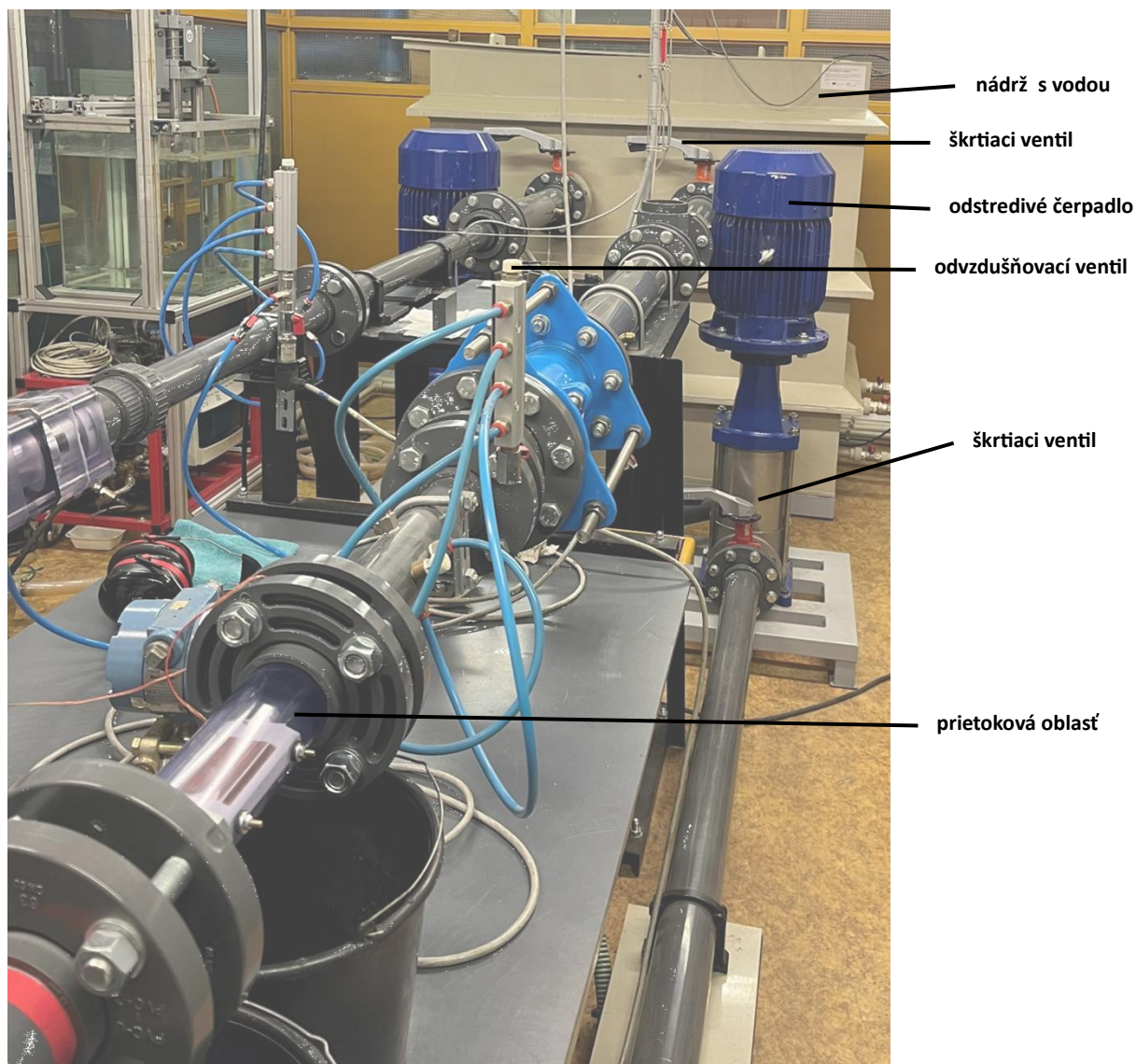
4.2 Návrh experimentu

Experimentálnu trať sme zostavili na základe štúdie [26], z ktorej sme prebrali návrh zostavy hydraulického systému generujúceho kavitáciu za pomoci clony. Následne sme začali s návrhom lopatky a spôsobom upevnenia MFC na danú dopadovú komponentu. Na záver sme uskutočnili experiment a vyhodnotili ideálne prevedenie pre generovanie elektrickej energie z kavitácie.

4.2.1 Experimentálne zariadenie

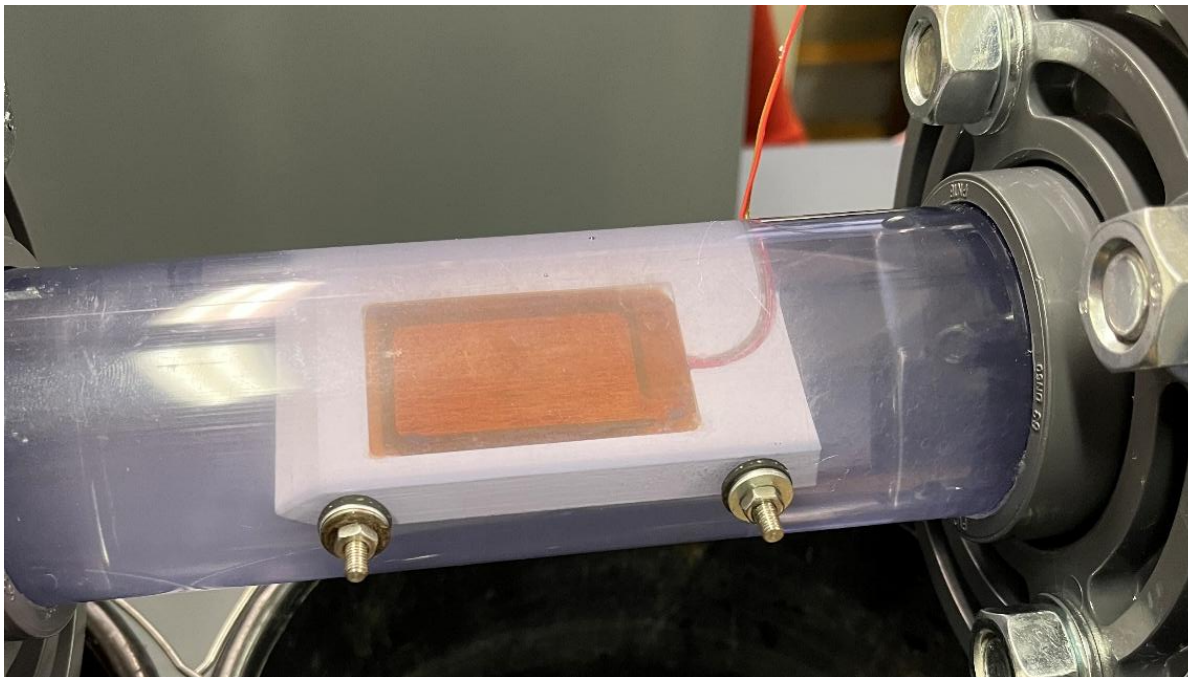
Pre náš experiment sme použili kavitačnú trať, ktorá sa nachádza v *laboratoři hydraulických strojů Odboru fluidního inženýrství v Brně* [26]. Tento obch **Obrázok 4-4**, sa skladá z nádrže s vodou, odstredivého čerpadla s frekvenčným meničom, škrtiacich ventilov, odvzdušňovacích ventilov a nami vytvorenej prietokovej oblasti z plexiskla. Neskôr sme pridali do zostavy aj piezoelektrický Kistler snímač značky PCB PIEZOTRONICS model 113B28.

Vstupné hodnoty sú známe na základe poznania práce [26], v ktorej autor skúmal spôsoby opotrebenia materiálu kavitačnou eróziou. Pre náš experiment sme použili rovnaký návrh kavitačnej komory, ako autor tejto práce. Priemer potrubia, materiál potrubia či dĺžka, boli z tejto práce preberané, takisto ako aj tvar a veľkosť clony. V experimente sme zohľadnili rôzne hodnoty prietoku a vyhodnotili najideálnejšie prevedenie.

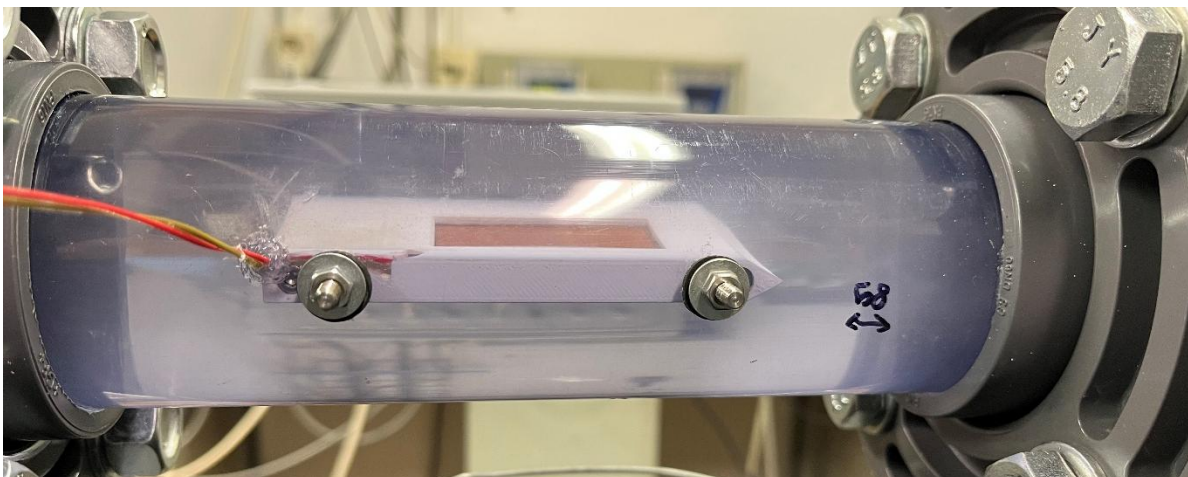


Obrázok 4-4 -Experimentálna zostava, zdroj: autor

Prietoková oblasť **Obrázok 4-5** nám poskytuje možnosť z blízka pozorovať priebeh kavitácie a jej vplyvy na lopatku. Takisto slúži na kontrolu tesnosti spojov v prírubách alebo v okolí káblov. Po vložení dopadovej komponenty do prietokovej oblasti sa vyvedú spojovacie káble **Obrázok 4-6** mimo potrubia a do osciloskopu. Pred zapnutím čerpadla sa systém zavodní a odvzdušní **Obrázok 4-10** pomocou ventilov.

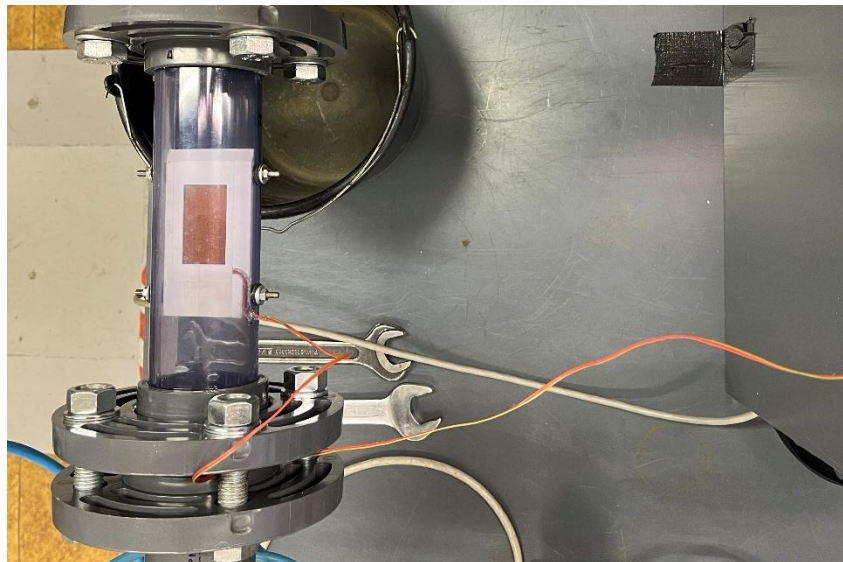


Obrázok 4-5 – Prietoková oblasť z plexiskla s umiestnenou lopatkou č.2 v odvzdušenom systéme, zdroj: autor



Obrázok 4-6 - Vývod káblov stranou potrubia cez dierku ktorá je následne zatesnená, zdroj: autor

Spojenie nášho *piezo* snímača s osciloskopom značky RIGOL, je bližšie zobrazená na **Obrázok 4-7**, kde je kábel po utesnení prevedený prírubou pre zaistenie eliminácie nechceného vytrhnutia z povrchu lopatky. **Obrázok 4-8** popisuje spôsob zapojenia spojovacích káblov do osciloskopu (CH1).

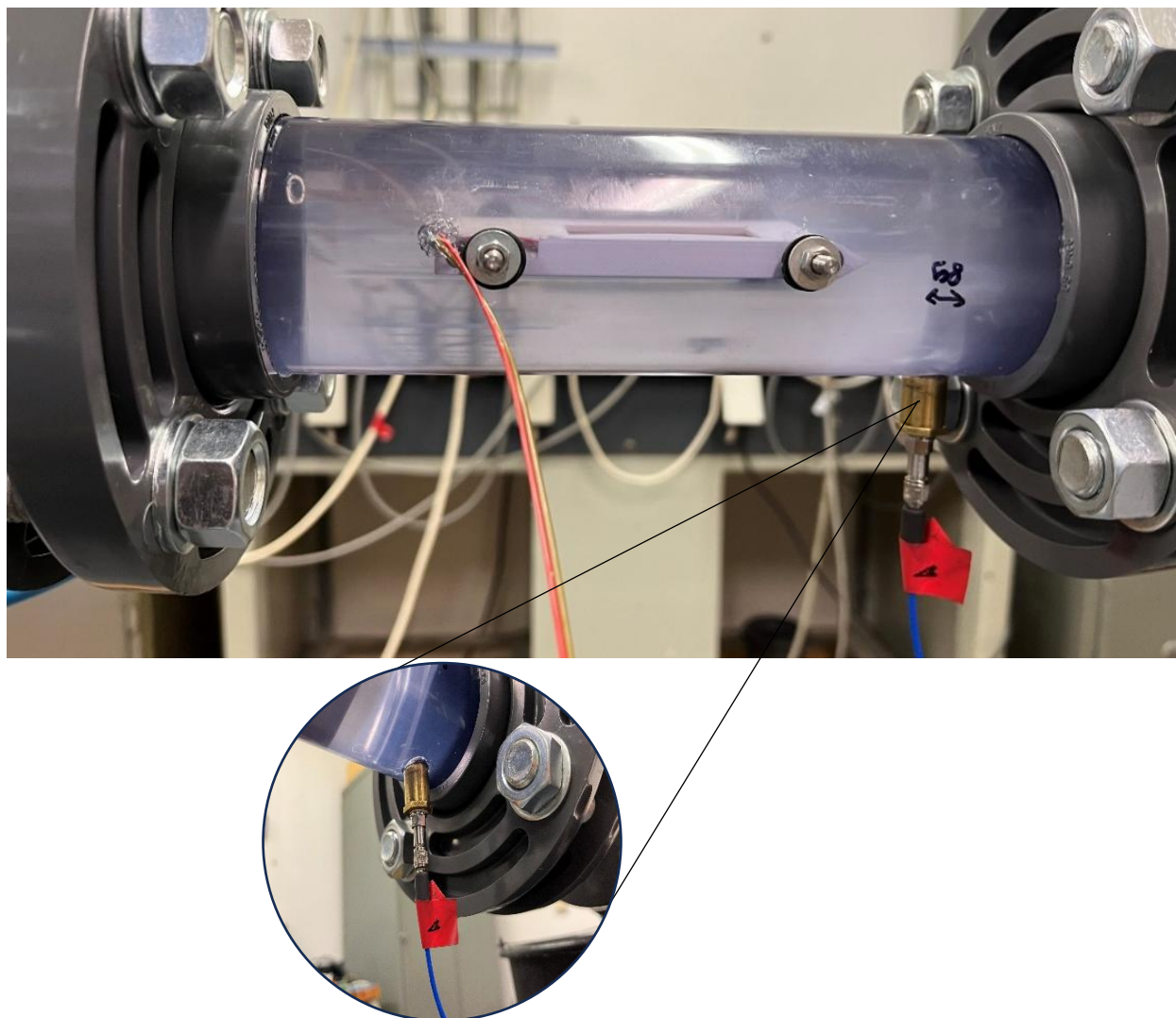


Obrázok 4-7 – Vedenie káblov z potrubia cez zatesnení spoj, zdroj: autor



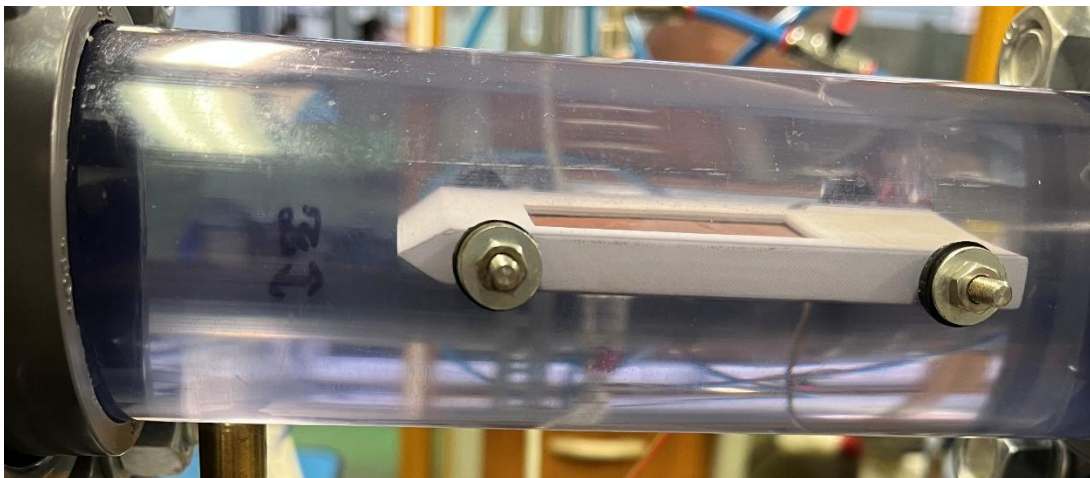
Obrázok 4-8 – Spôsob spojenia patchu s osciloskopom a odporovou dekadou, zdroj: autor

Obrázok 4-9 ukazuje spôsob pripojenia snímača pre druhé meranie, za pomoci ktorého sme boli schopní zmerať skokové zmeny statického tlaku.



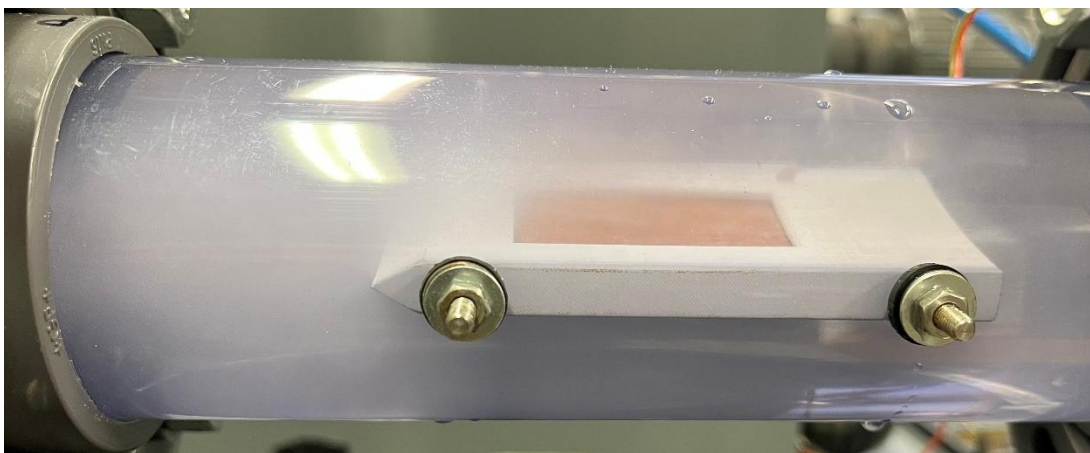
Obrázok 4-9 – Umiestnenie a typ zavedenia snímača Kistler do prietokovej oblasti, zdroj: autor

Snímač tlaku bol zavedený do prietokovej oblasti za pomoci vyvrtania závitú a následného utesnenia pomocou teflónovej pásky. Spojovací kábel bol zapojený do zosilňovača, ktorý slúži na prevedenie vysoko-impedančného výstupu zo snímača na nízko-impedančný napät'ový signál.



Obrázok 4-10 – Prietoková oblasť po zavodení a odvzdušnení, zdroj: autor

Na **Obrázok 4-11** je zachytená prietoková oblasť s rozvinutou kavitačnou oblasťou. Pri realizácii experimentu sme nastavili prietoky na hodnoty, ktoré sprevádzali rôzne kavitačné fázy.



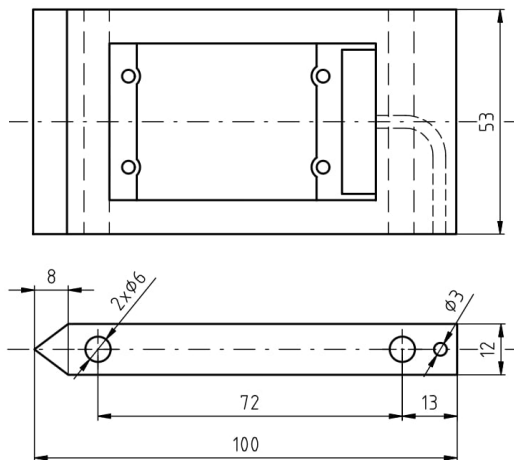
Obrázok 4-11 – Prietoková oblasť s rozvinutou kavitačiou, zdroj: autor

4.2.2 Návrh dopadovej komponenty

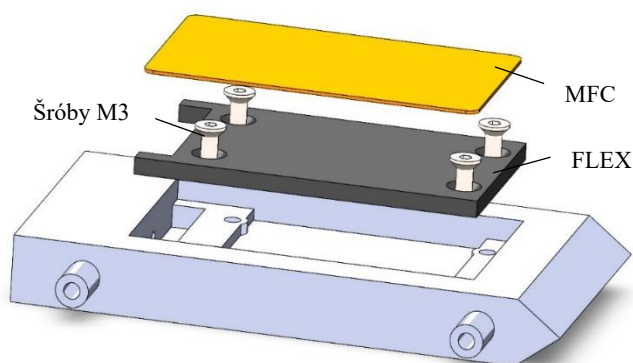
Základný tvar dopadovej lopatky je takisto prebraný z práce [26], no upravený pre použitie s piezoelektrickým snímačom, ktorý bude umiestnený v oblasti zániku kavitačných bublín. Zánik bublinky a následný dopad *jetu* na povrch *pieza*, bude slúžiť ako excitačný mechanizmus pre vznik elektrickej energie. Tvar dopadovej komponenty bol niekoľkokrát modifikovaný za účelom eliminácie vzniknutých komplikácií, zlepšenia funkčnosti systému a finálnej účinnosti. Pre porovnanie týchto prístupov sme zhotovili niekoľko variant návrhov lopatky. Lopatky boli navrhnuté s jednotnou roztečou uchytenia k potrubiu, s cieľom zabezpečiť kompatibilitu pri výmene lopatiek počas experimentu. Návrhy lopatiek boli realizované za pomoci FDM tlače, pre možnosť rýchlej iterácie a úprav počas experimentu.

Návrh č.1 (Obrázok 4-12)

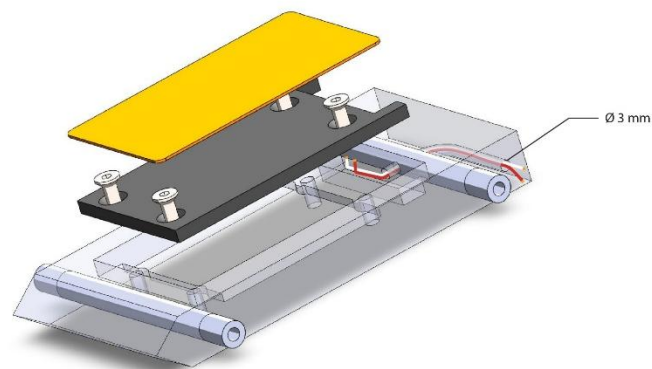
Patch je prilepený na vrstve vytlačenej z materiálu FLEX (TPU) 3D, ktorý slúži ako elastická výstelka MFC filmu. Pre šetrnosť voči ohybu MFC sme pridali flexibilnú vrstvu, ktorá je uchytaná o základ lopatky za pomoci 4 skrutiek M3, so zapustenou hlavou, pre zlepšenie tesniacich vlastností **Obrázok 4-13**. *Piezo* je uchytané o elastický materiál za pomoci lepidla. Kontakty MFC sú napájkované a drôťky vložené do vybratia, ešte pred vložením lopatky do potrubia. Drôťky sú po spojení s *patchom* vložené do predvrtanej tyče a vyvedené von z potrubia za pomoci kanálíka, ktorý je následne zasilikónovaný **Obrázok 4-14**. Hrúbka lopatky je navýšená, pre zlepšenie ohybu MFC filmu. $h=12\text{mm}$



Obrázok 4-12 – Technický náčrt návrhu dopadovej lopatky č. 1, zdroj: autor



Obrázok 4-13 – Spôsob uloženia MFC a flexibilnej vrstvy na lopatku, zdroj: autor

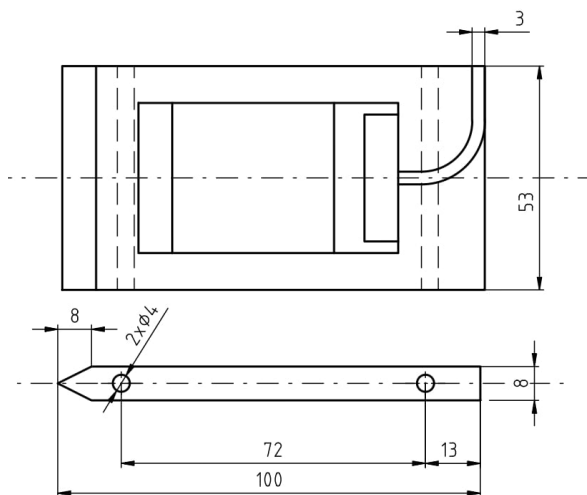


Obrázok 4-14 – Vyvedenie spojovacích káblov z lopatky, zdroj: autor

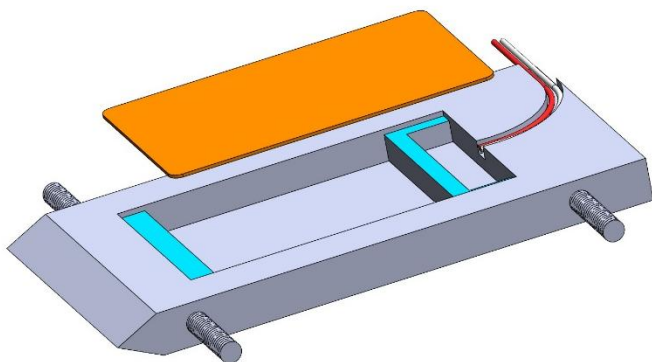
Tento návrh však nebol realizovaný po úvahe, že vložka by mohla spôsobiť silný tlmiaci efekt voči priehybu. Takisto náročnosť prípravy závitovej tyče s dierou predstavovala nepríjemnú prekážku.

Návrh č.2 (Obrázok 4-15)

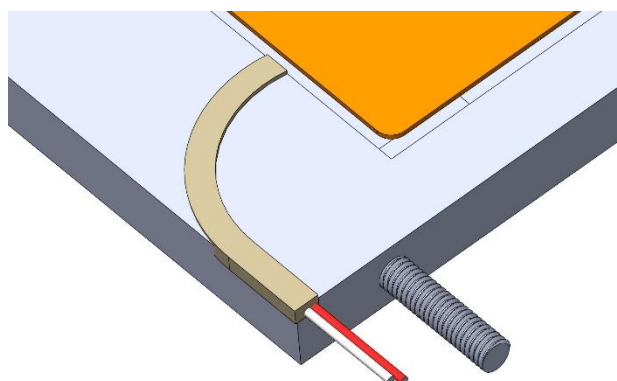
V tejto variante sme sa rozhodli zmenšiť výšku lopatky a umiestniť MFC na povrch lopatky cez dosadové plochy **Obrázok 4-16** za pomoci epoxidu. Keďže elastická membrána by mohla mať nepriaznivý dopad na priehyb *patchu*, v tomto návrhu sme dutinu pod *piezom* nechali vyplniť tekutinou. Hrúbka steny je $h=8\text{mm}$ a uchytenie lopatky do potrubia je realizované pomocou závitovej tyče M4. Spôsob vývodu káblov je realizovaný z úložného vybratia, za pomoci dutiny umiestnenej vo vrchnej časti lopatky, a následného utesnenia pomocou silikónu alebo tavného lepidla **Obrázok 4-17**.



Obrázok 4-15 - Technický náčrt návrhu dopadovej lopatky č. 2, zdroj: autor



Obrázok 4-16 – Spôsob upevnenia MFC patchu na dosadové plochy a vyvedenie spojovacích káblov, zdroj: autor

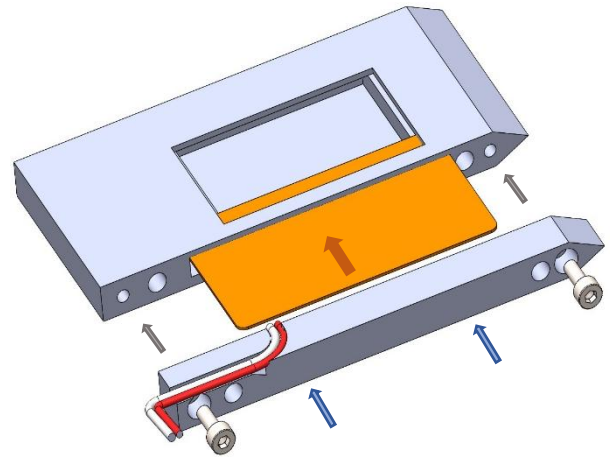


Obrázok 4-17 – Detail vyvedenia a utesnenia káblov za pomoci tavného lepidla, zdroj: autor

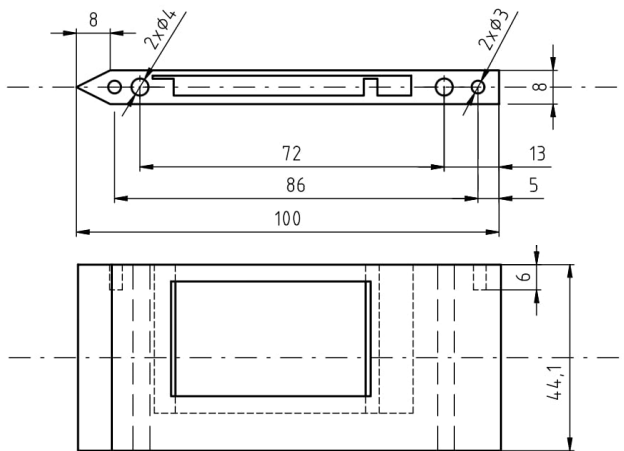
Pri meraní sa ukázalo, že upevnenie *patchu* ako v návrhu č.2 nie je vhodné pre cyklické namáhanie vznikajúce kavitáciou. Pri kavitácii dochádza ku kavitáčnej erózii, ktorá poškodzuje povrch lopatky a s ním aj vrstvu spojiva medzi MFC a lopatkou.

Návrh č.3

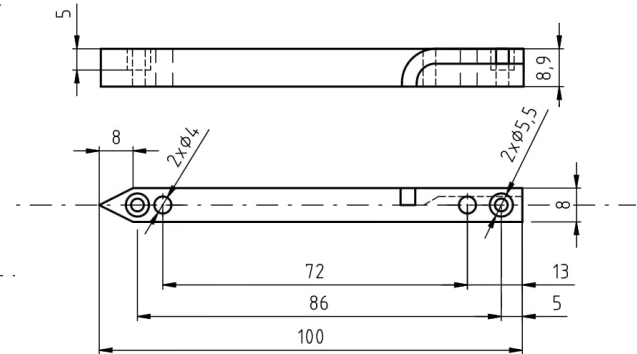
Cieľom tretieho návrhu bolo uchytenie *patchu* na lopatku bez použitia lepidla, mechanickým spojím. Lopatku sme rozdelili na dve časti, telo **Obrázok 4-19** a prírubu. Príruba dosadá na telo a za pomoci dvoch skrutiek M3 pevne zviaza MFC *patch* v statickej polohe **Obrázok 4-18**. Piezoelektrický senzor je po spájkovaní s káblami vložený do vybratia. Vybratie je navrhnuté na spodnú toleranciu *patchu*, keďže sa snažíme dosiahnuť čo najpevnejšieho upnutia. *Piezo* sa nachádza 1,2 mm pod úrovňou lopatky a vybratie pod hlavnými opornými bodmi slúži na priehyb daného snímača **Obrázok 4-21**. Hrúbka lopatky je opäť $h = 8$ mm a upnutie do potrubia je realizované závitovými tyčami M4 **Obrázok 4-20**. Spojovacie káble sú vyvedené z potrubia za pomoci vybratia v prírubе, ktorá je následne utesnená.



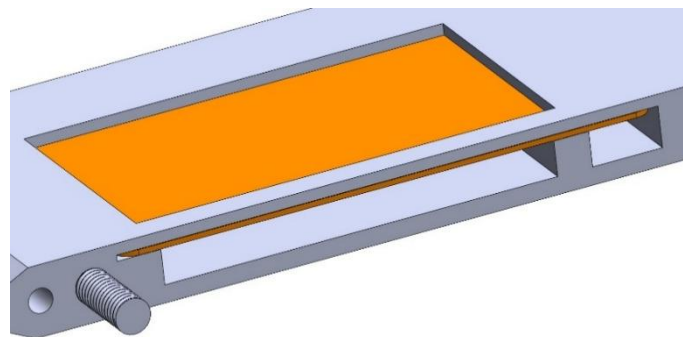
Obrázok 4-18 – Spôsob uchytenia MFC pomocou príruby a vyvedenie káblov, zdroj: autor



Obrázok 4-19 - Technický náčrt návrhu dopadovej lopatky č. 3 - telo, zdroj: autor



Obrázok 4-20 - Technický náčrt návrhu dopadovej lopatky č. 3 - príruha, zdroj: autor



Obrázok 4-21 - Priestor priehybu vyplnení kvapalinou po zasunutí patchu, zdroj: autor

4.3 Vyhodnotenie experimentu

Na základe teoretických predpokladov a štúdií sme finálne zostavili viacero variant experimentálnych meraní.

Prvotné skúmanie

Lopatka č. 2 bola použitá pre iniciálne zavedenie a odskúšanie správania *patchu* v kavitujucej oblasti. Pri tomto pokuse bol však *patch* po niekoľko minútach strhnutý z lopatky z dôvodu kavitačného opotrebenia, ktoré rozrušilo adhéznú vrstvu prichytávajúcu *patch* o lopatku. Tento návrh bol realizovaný vo viacerých prevedeniach, s použitím rôznych lepidiel (epoxid, tavné lepidlo), no napriek niekoľkým pokusom bol neúspešný.

Prvé meranie

Pri prvom meraní sme použili lopatku podľa návrhu č. 3, na základe ktorého sme boli schopní určiť základy pre prevedenie tohto experimentu a určenie hlavných vstupných hodnôt ovplyvňujúcich výslednú funkčnosť. Z tohto experimentálneho prevedenia sa potvrdilo, že mechanický spoj medzi lopatkou a filmom poskytuje dostatočnú tuhosť a odolnosť voči kavitačnému opotrebeniu, bez viditeľných známkov poškodenia alebo uvoľnenia spoja počas doby merania.

Druhé meranie

Finálne meranie bolo prevedené takisto s návrhom č. 3, s rovnakými vstupnými hodnotami prietoku a odporov. Do zostavy sme však pridali tlakový snímač Kistler 113B28, umiestnený približne 20 mm za clonu, ktorá generuje kavitačné prúdenie. Hlavným dôvodom bolo rozlíšenie pulzácií generovaných clonou a pulzácií spôsobených zánikom kavitačných bublín na povrchu MFC *patchu*. Za pomoci FFT analýzy oboch snímaných signálov sme dokázali vyhodnotiť vplyvy jednotlivých javov a vzájomne ich porovnať.

4.3.1 Prvé meranie

Pre prvé vyhodnotenie sme použili dopadovú komponentu č. 3, ktorú sme umiestnili do potrubia a vystavili ju opätovnému mechanickému zaťaženiu od dopadu kavitačných *jetov* na povrch *patchu*. Signál z piezoelektrického snímača bol zaznamenávaný pomocou osciloskopu, po dobu 10s. Aby sme boli schopní vyhodnotiť efektívnosť generovanej energie z piezoelektrického článku, záznam dát sme realizovali s odlišnými odporovými záťažami. Vplyv tejto záťaže sme skúmali v rozmedzí 12 až 24kΩ s krokom 2kΩ. Z nameraných hodnôt, ktoré prestavovali reálny priebeh napätia, sme za pomoci programu MATLAB pre každú hodnotu odporu vyhodnotili efektívnu hodnotu napätia V_{rms} pomocou vzťahu (13),

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U(t)^2} \quad (10)$$

Kde: N – počet vzoriek [-]

$U(t)$ – priebeh napätia generovaného *patchom* na čase [V]

V_{rms} – efektívna hodnota napätia [V]

a z nej odvodený výkon za pomoci vzťahu (11)(13).

$$P = \frac{V_{rms}^2}{R} \quad (11)$$

Kde: P – elektrický generovaný výkon [W]

R – Odpor [Ω]

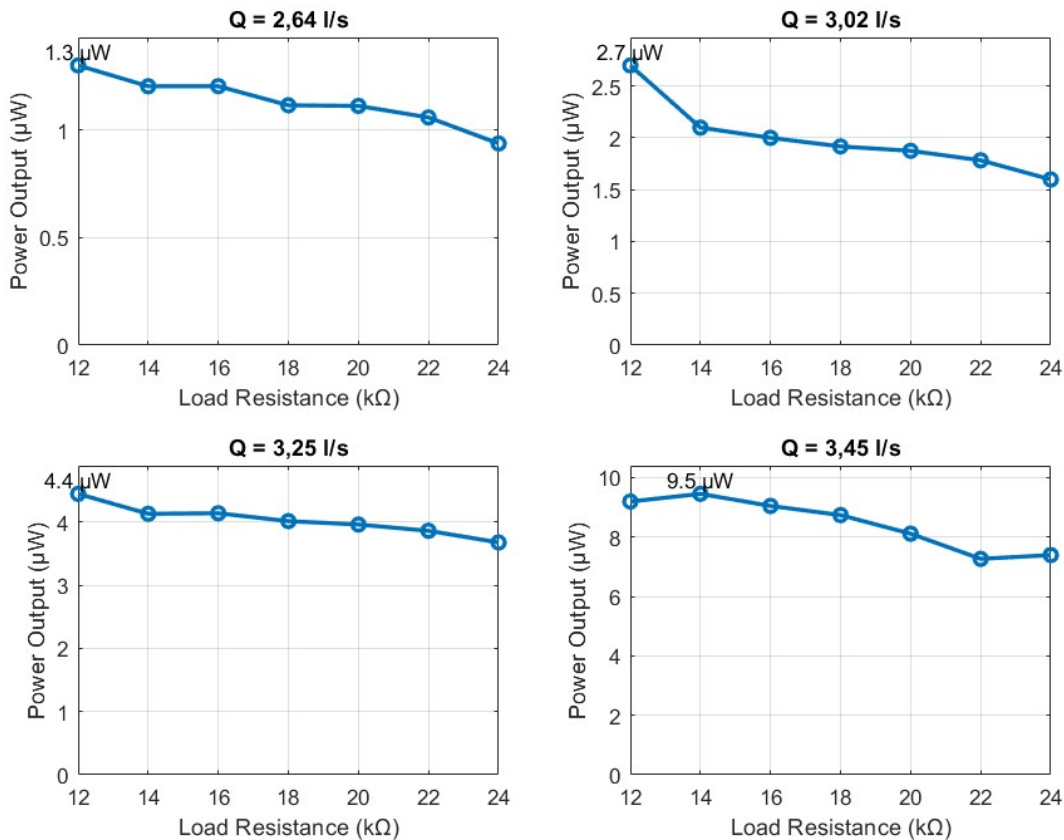
Experimentálne dáta boli získavané pre štyri rôzne hodnoty prietoku, ktoré boli vybrané na základe pozorovania počiatkov kavitačnej oblasti a jej následného rastu. Bližšie okolnosti ohľadom priebehu tlakov alebo tlakových strát neboli bližšie skúmané. **Tabuľka 1** udáva namerané hodnoty výkonu pri daných hodnotách prietokov:

- $Q = 2,64\text{l/s}$
- $Q = 3,02\text{l/s}$
- $Q = 3,25\text{l/s}$
- $Q = 3,45\text{l/s}$

Tabuľka 1 – Vypočítaný výkon pre jednotlivé hodnoty prietokov, zdroj: autor

		Odpor ($k\Omega$)						
		12	14	16	18	20	22	24
Prietok (l/s)	2,64	1.302 μW	1.205 μW	1.205 μW	1.116 μW	1.113 μW	1.060 μW	0.938 μW
	3,02	2.699 μW	2.099 μW	2.000 μW	1.918 μW	1.875 μW	1.784 μW	1.599 μW
	3,25	4.448 μW	4.132 μW	4.141 μW	4.016 μW	3.962 μW	3.863 μW	3.678 μW
	3,45	9.192 μW	9.450 μW	9.045 μW	8.736 μW	8.110 μW	7.263 μW	7.391 μW

Z tabuľky je zrejmé že s rastúcim prietokom rastie aj výkon. Pri väčšom prietoku vzniká väčšia kavitačná oblasť, čo spôsobuje aj nárast kinetickej energie, resp. nárast generovanej energie. Maximum bolo dosiahnuté pri prietoku 3,45 l/s a odpore 14 k Ω , kde výkon dosiahol hodnoty 9,45 μ W **Graf 1**. Tieto výsledky slúžia ako potenciálny podklad pre výber správneho prevedenia experimentu. Na základe prvého prevedenia experimentu, môžeme dedukovať, že veľkosť záťaže zjavne ovplyvňuje výstupný generovaný výkon nášho *patchu*.



Graf 1 - Grafické znázornenie priebehu výkonu vzhľadom na odpor pre všetky štyri druhy prietokov, zdroj: autor

4.3.2 Druhé meranie

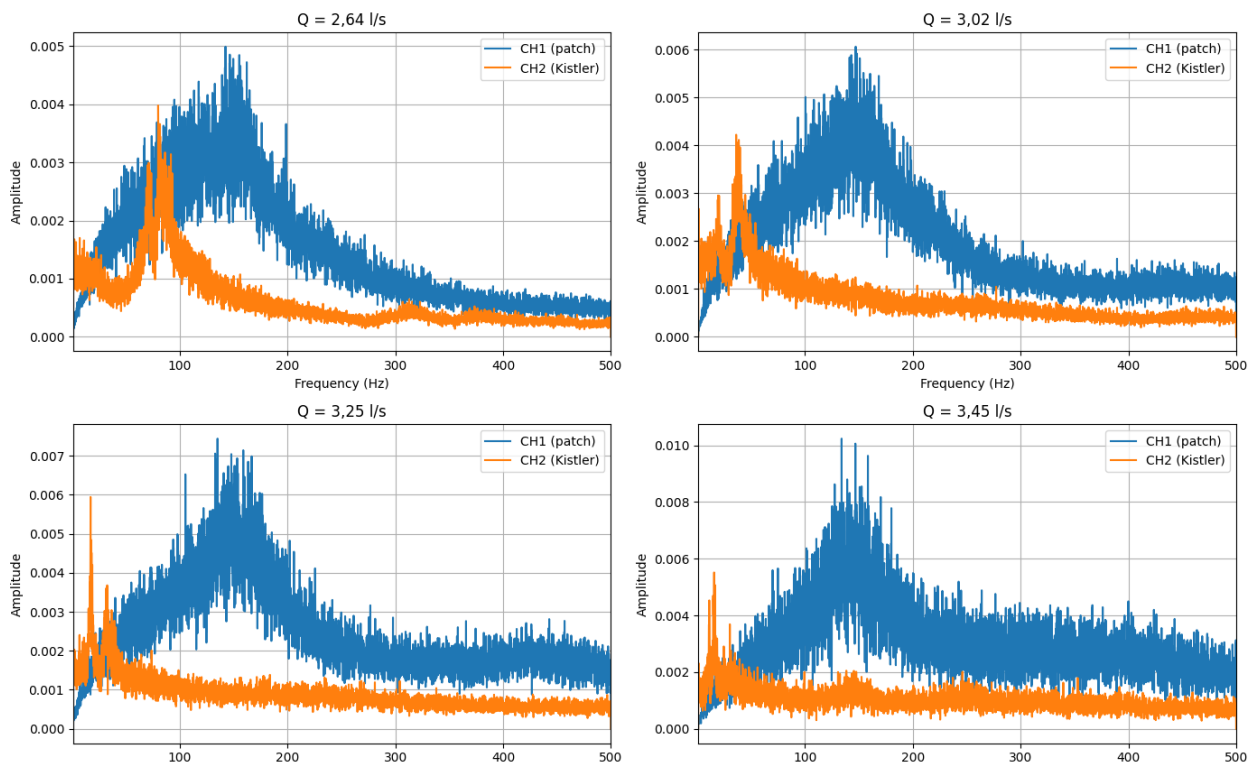
V rámci druhého experimentálneho merania sme využili rovnakú lopatku, ako v prvom meraní, pri zachovaní škály objemových prietokov, z dôvodu zabezpečenia porovnateľnosti výsledkov. Na rozdiel od prvého merania sme tentokrát rozšírili rozsah záťažových hodnôt pripojených k piezoelektrickému článku, v intervale od 8 $k\Omega$ do 16 $k\Omega$, čím sme získali širšiu škálu prevádzkových bodov pre vyhodnotenie výkonových charakteristík.

Pre druhé meranie sme rozšírili meraciu sústavu o tlakový snímač Kistler 113B28, umiestnený približne 20 mm za clonu generujúcu kavitáciu, s cieľom odlišiť pulzácie vznikajúce vplyvom clony a pulzácie spôsobené zánikom kavitačných bublín na povrchu piezoelektrického filmu.

Výstup dát zo snímača bol meraní osciloskopom v tvare priebehu napätia $V_K(t)$. Namerané napätie bolo následne za pomoci vzťahu (12), prevedené na tlakový signál $p(t)$.

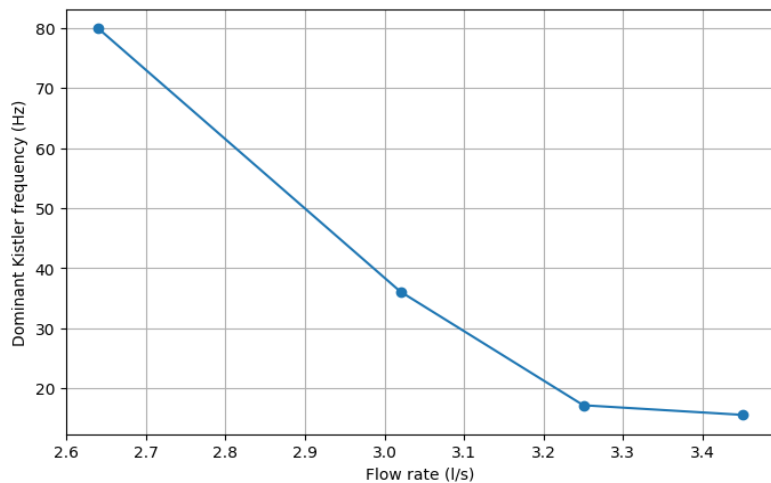
$$p(t) = \frac{V_K(t)}{S_p} \quad (12)$$

Hodnota S_p predstavuje senzitivitu snímača, ktorá bola pre nami použitý snímač rovná $14,870 \text{ mV/kPa}$. Na základe analýzy časových priebehov a ich frekvenčného spektra (FFT) sme identifikovali dominantnú zložku v signáli z MFC *patchu* a tlakového snímača. Zo získaných dát sme boli schopní vyčíslit' charakteristické frekvencie a amplitúdy jednotlivých typov pulzácií.



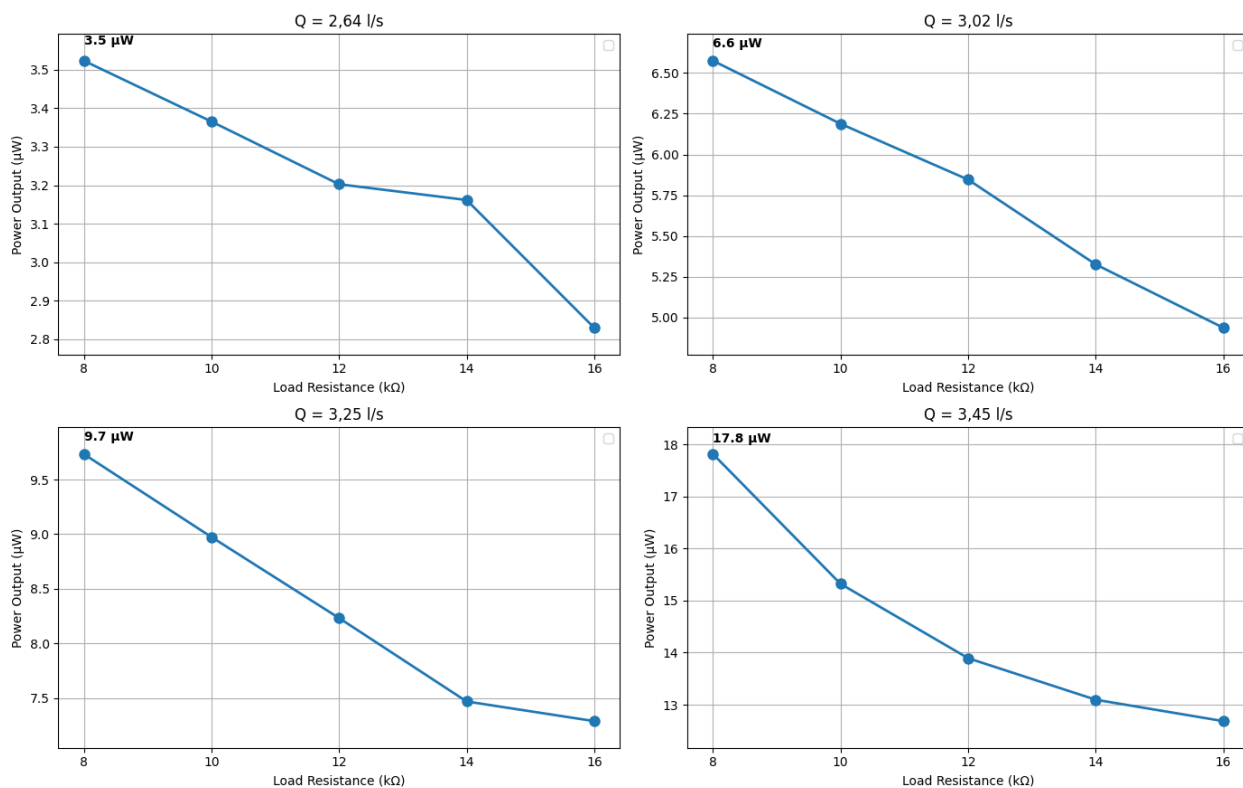
Graf 2 – FFT analýza Patch/Kistler vzhľadom na veľkosť prietoku, zdroj: autor

Graf 2 zobrazuje frekvenčné spektrá z MFC *patchu* a tlakového snímača Kistler. Porovnaním spektier je zrejmé, že sa tieto dve charakteristiky od seba líšia. Dôvodom je spôsob uloženia tlakového snímača Kistler, ktoré sa nachádza 20 mm za clonou. To spôsobuje, že daný senzor zachytáva len lokálne tlakové špičky spôsobené zánikom vírových krúžkov, zatiaľ čo MFC *patch* zachytáva celkové vplyvy kavitácie vrátane tlakových vln a lokálnych nárazov od kolabujúcich bubliniek na povrchu. V dôsledku toho MFC *patch* poskytuje obraz kavitácie ako celku, zatiaľ čo Kistler popisuje len dôsledok spätného rázu od vírových krúžkov. Pre zvýraznenie kľúčovej časti spektra boli vrchné „nepracovné“ frekvencie eliminované. Rozmedzie sledovaných frekvencií bolo stanovené v rozmedzí 1-500 Hz.



Graf 3 popisuje závislosť polohy dominantného kmitočtu na objemovom prietoku. Zobrazená charakteristika popisuje pokles dominantnej frekvencie s rastúcim prietokom. Tento výsledok je však opakom našich predpokladov.

Graf 3 – Závislosť dominantnej frekvencie Kistlera na prietok, zdroj: autor



Graf 4 – Závislosť generovaného výkonu na odpore, zdroj: autor

Pre zistenie optimálnej veľkosti záťaže bolo vykonané meranie generovaného výkonu v závislosti na veľkosti záťažového odporu. Výsledky tohto merania sú vyobrazené v **Graf 4**.

5 Diskusia

Na základe literárnej rešerše a následnej analýzy experimentálnych výsledkov sme dospeli k nasledujúcim záverom:

- S ohľadom na úsporu času a materiálnych prostriedkov bola zvolená FDM tlač s použitím materiálu PLA, čo bolo výhodou z hľadiska flexibility návrhov. Pri realizácii experimentu sa však ukázali viaceré limity zvoleného procesu výroby a materiálu. Základným problémom bola životnosť dopadovej komponenty pri prevádzkových podmienkach. To sa prejavilo delamináciou a únavou materiálu. Pre nadväzujúci výskum by použitie kovového materiálu predstavovalo lepšiu variantu voči negatívnym kavitačným vplyvom.
- Experimentálne prevedenie lopatky č. 3 bolo vhodné z dôvodu mechanického upevnenia *patchu*, avšak na úkor nižšej účinnosti. MFC je v tomto návrhu umiestnený pod úrovňou nábežnej hrany lopatky, čo ovplyvňuje pôsobenie kavitačných *jetov* na *patch*. Návrh č. 2 predstavoval lepšie koncepčné riešenie ohľadom účinnosti, no spôsob uchytenia MFC bol nedostatočný voči kavitačným vplyvom. Pre ďalšiu fázu výskumu by najvhodnejšiu variantu predstavoval návrh lopatky kde je *patch* upnutý mechanicky a kde je účinnosť maximálna.
- Pri realizácii experimentu bol použitý piezoelektrický snímač P-876.A12, ktorý je len jedným z mnohých druhov snímačov. Nadväzujúca štúdia by sa taktiež mohla zamerať na prieskum rôznych druhov piezoelektrických senzorov.
- Pri analýze závislosti dominantnej frekvencie tlakového snímača na prietoku výsledky nespĺňali predpokladaný priebeh. Napriek intuitívnej očakávanej závislosti „väčší prietok = vyššia frekvencia“ je možné tento dej vysvetliť na základe Strouhalovo čísla zo vzťahu (13)

$$St = \frac{f \cdot L_c}{v_t} \quad (13)$$

Kde: f – frekvencia uvoľňovaná vírom [Hz]
 L_c – priemerná dĺžka kavitačnej oblasti [m]
 v_t – rýchlosť prúdenia v zúženej časti [$m \cdot s^{-1}$]

Vzťah popisuje že pri vyššom prietoku stúpa aj L_c čím frekvencia klesá. Pokles frekvencie môže byť spôsobený prechodným správaním kavitácie z „cloud cavitation“ do „re-entrant jet/shockwave cavitation“ a následne do „shockwave shedding cavitation“ [27].

Pri experimentálnom meraní však nebolo možné určiť dôležité hodnoty vstupujúce do daného vzťahu. Takže túto skutočnosť nebolo možné overiť výpočtom. Ďalším dôvodom vzniku rozporu medzi experimentom a predpokladmi, môže byť napríklad nepresnosť meracích prístrojov, elektromagnetický ruch alebo nesprávne vynesenie dát.

- Z prvých dvoch meraní boli získane hodnoty generovaného napätia z MFC, ktoré sa aj napriek rovnakému prevedeniu celého experimentu značne líšili. Jediný rozdiel medzi meraniami bolo pripojenie Kistlera pre experimentálne prevedenie č. 2, čo mohlo ovplyvniť získane hodnoty napätia na báze elektrického ruchu. K rozdielnym hodnotám mohlo prispieť aj čiastočné opotrebenie dopadovej komponenty z predchádzajúceho merania. Pre potvrdenie tejto hypotézy by bolo potrebné experiment opakovane uskutočniť.
- Kvalitný podklad pre nadväzujúci výskum predstavuje CFD simulácia. Podrobná vizualizácia slúži na predbežné určenie vstupných hodnôt a priebehu skúmanej oblasti. Táto virtuálna analýza poskytuje možnosť nazrieť do problematiky ešte pred započatím experimentu a tým ušetriť čas a prostriedky.

6 Záver

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo navrhnuť a overiť možnosť spätného získavania energie z kavitácie pomocou piezoelektrického *patchu*. Kavitácia, jav vyvolaný lokálnym poklesom statického tlaku je tradične považovaný za nežiaduci, kvôli erozívnym účinkom na hydraulické systémy. Pri zániku kavitačnej bublinky vzniká veľké množstvo koncentrovanej energie, ktoré predstavuje potenciálny zdroj pre energy harvesting.

V úvode práce sme sa oboznámili s ovplyvňujúcimi faktormi a vplyvmi kavitácie, zoznámili sa s problematikou energy harvestingu a popísali piezoelektrický jav. Na základe týchto vstupov sme si určili ciele a predpoklady pre našu experimentálnu štúdiu.

V experimentálnej časti boli navrhnuté tri varianty dopadových lopatiek pomocou FDM tlače, ktoré boli následne otestované v hydraulickej trati s riadeným prietokom. Navrhované dopadové komponenty boli v rámci experimentu skúmané vzhľadom na ich preferované vlastnosti a následne testované v pripravenej experimentálnej zostave. Pre meranie sa využil piezoelektrický MFC *patch* (P-876.A12) súbežne s tlakovým snímačom (Kistler 113B28), pričom oba výstupy boli synchronizovane zaznamenávané na digitálnom osciloskope (RIGOL MSO5204). Na základe výsledkov z prvého merania sme overili funkčnosť a správnosť návrhu systému, zároveň sme preukázali závislosť generovaného výkonu na záťažovom odpore. Druhým meraním sme doplnili a bližšie špecifikovali výsledky z prvého merania, pri ktorom sme dosiahli maximálneho výkonu $17,8 \mu W$ pre prietok $3,45 \text{ l/s}$ a s použitím odporu o veľkosti $8 k\Omega$. V rámci finálneho zhrnutia výsledkov a vyhodnotenia stanovených cieľov práce sme načrtli možné postupy pre nadväzujúce skúmania.

Z analýzy výsledkov vyplýva, že kavitácia má výrazný energetický potenciál, aj keď doteraz bola ako zdroj energie takmer nepreskúmaná. S naplnením stanovených cieľov bakalárskej práce sme prispeli k výskumu tejto témy, energy harvestingu z kavitácie.

Použité informačné zdroje

- [1] J. Noskievič, *Kavitace v hydraulických strojích a zařízeních*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989.
- [2] C. E. Brennen, *Cavitation and bubble dynamics*. New York: Cambridge University Press, 2014. [Online]. Available: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/natl-ebooks/detail.action?docID=1543650>
- [3] C. E. Brennen, “Cavitation in medicine”, *Interface Focus*, doi: 10.1098/rsfs.2015.0022.
- [4] M. Brdička, *Kavitace: diagnostika a technické využití*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1981. [Online]. Available: <http://krameriusndk.nkp.cz/search/handle/uuid:4531aba0-27f6-11e6-ae84-005056827e51>
- [5] X. Feng, Y. Liu, and B. Wang, “An improved laminar–turbulent transition cavitation model using the IDDES method”, *Ocean engineering*, no. 297, 2024, doi: 10.1016.
- [6] J. -P. Franc and J. -M. Michel, *Fundamentals of cavitation*. in Fluid mechanics and its applications. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, c2004.
- [7] M. Tinguely, D. Obreschkow, P. Kobel, and M. Farhat, “Energy partition at the collapse of spherical cavitation bubbles”, *Physical Review*, vol. 86, no. 4, 2012, doi: 10.1103/PhysRevE.86.046315.
- [8] B. Jin and H. Soyama, “Non-Spherical Cavitation Bubbles: A Review”, *Fluids*, vol. 9, no. 249, 2024, doi: 10.3390/fluids9110249.
- [9] E. Alexandru Brujan and A. Vogel, “The final stage of the collapse of a cavitation bubble close to a rigid boundary”, *Physics of Fluids*, vol. 14, no. 1, 2002, doi: 10.1063/1.1421102.
- [10] C. E. Brennen, G. Reisman, and Y. C. Wang, “Dynamical Interactions in a Multi-Bubble Cloud”, *Journal of Fluids Engineering*, vol. 114, no. 4, 1992, doi: 10.1115/1.2910085.
- [11] G. L. Chahine and R. Duraiswami, “Dynamical Interactions in a Multi-Bubble Cloud”, *Journal of Fluids Engineering*, vol. 114, no. 4, Dec. 1992, doi: 10.1115/1.2910085.
- [12] Y. Tomita and A. Shima, “Destructive Action of Cavitation Bubbles Collapsing Near Boundaries”, in *Shock Focussing Effect in Medical Science and Sonoluminescence*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003, pp. 73-109. doi: 10.1007/978-3-662-05161-0_4.

- [13] M. Chjeelenahalii, C. Kumar Rastogi, M. Rao, and A. Khosla, “Advances in Hierarchical Inorganic Nanostructures for Efficient Solar Energy Harvesting Systems”, *ChemSusChem*, vol. 2023, no. 17, 2024, doi: 10.1002/cssc.202301755.
- [14] R. Kumar and R. Singh, *Thermoelectricity and Advanced Thermoelectric Materials*. Elsevier, 2021. doi: 10.1016/C2019-0-01167-3.
- [15] D. Zhu and S. P Beeby, “Kinetic Energy Harvesting”, *Acta Futura*, vol. 2008, no. 4, 2010, doi: 10.1007/978-1-4419-7566-9_1.
- [16] R. Calìo *et al.*, “Piezoelectric Energy Harvesting Solutions”, *Sensors*, 2014, doi: 10.3390/s140304755.
- [17] S. N. Thankur, “Piezoelectric and inverse piezoelectric effects on piezoelectric crystals: Applications across diverse conditions.”, 2024.
- [18] “MFC - Macro Fiber Composite”, Smart Material. Accessed: Oct. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.smart-material.com/MFC-product-mainV2.html>
- [19] B. Tiwari, C., and B., “Piezoelectric lead zirconate titanate as an energy material: A review study”, *Materials Today: Proceedings*, no. 43, Accessed: Oct. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785320393676?via%3Dihub>
- [20] W. Sun, T. Tan, Z. Yan, D. Zhao, X. Luo, and W. Huang, “Energy harvesting from water flow in open channel with macro fiber composite”, *AIP Advances*, vol. 8, no. 9, 2018, doi: 10.1063/1.5035383.
- [21] D. Cao, J. Wang, X. Guo, S. K. Lai, and Y. Shen, “Recent advancement of flow-induced piezoelectric vibration energy harvesting techniques: principles, structures, and nonlinear designs”, *Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 43, no. 7, 2022, doi: 10.1007/s10483-022-2867-7.
- [22] Z. Li, J. Roscow, H. Khanbareh, C. R Bowen, and G. Haswell, “Energy Harvesting from Water Flow by Using Piezoelectric Materials”, *Advanced Energy and Sustainability Research*, no. 5, 2024, doi: 10.1002/aesr.202300235.
- [23] H. Xiao *et al.*, “Modelling and performance enhancement of the fluid coupling interface for hydraulic pressure energy harvesting by superposition of the static mean pressure and pressure fluctuations”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 224, 2025, doi: 10.1016/j.ymsp.2024.112042.
- [24] M. T. Gevari, M. Ghorbani, A. J. Svagan, D. Grishenkov, and A. Kosar, “Energy harvesting with micro scale hydrodynamic cavitation-thermoelectric generation coupling”, *AIP Advances*, vol. 9, no. 10, Oct. 2019, doi: 10.1063/1.5115336.

- [25] W. -H. Liao *et al.*, “Flow energy piezoelectric bimorph nozzle harvester”, Apr. 2014, p. 90570D-. doi: 10.1117/12.2045191.
- [26] L. Lecnar, “Opořebení materiálu kavitační erozí”, Diplomová práce, Brno, 2014/2015.
- [27] C. Wang and M. Zhang, “Dynamics of cavity structures and wall-pressure fluctuations associated with shedding mechanism in unsteady sheet/cloud cavitating flows”, *Flow*, vol. 3, 2023, doi: 10.1017/flo.2023.2.
- [28] S. Zhang, M. Chen, J. Bai, and J. Li, “Computation of macro-fiber composite integrated thin-walled smart structures”, *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2016, doi: 10.1088/1757-899X/137/1/012032.

Zoznam symbolov a skratiek

Skratky	Význam	Jednotky
CFD	Computational Fluid Dynamics	
FEV	Flow Energy Harvesting	
HPEH	Hydraulic Pressure Energy Harvesting	
MFC	Macro Fiber Composite	
PZT	piezoelektrický olovo-zirkonát-titanát (keramický materiál)	
Symboly	Popis	Jednotky
C_s	kapacita piezoelektrického patchu	F
S_p	citlivosť tlakového snímača	V/bar
$V_K(t)$	výstupné napätie snímača Kistler	V
V_{rms}	efektívna hodnota napätia	V
c	rýchlosť zvuku v médiu	m/s
D	charakteristický priemer	m
f_0	dominantná frekvencia	Hz
I	akustická intenzita	W/m ²
R	odpor	Ω
S	plocha prierezu	m ²
ρ	hustota	kg/m ³
σ	povrchové napätie	N/m
μ	dynamická viskozita	Pa · s
p_{kav}	kavitačný tlak	Pa
p_w	tlak nasýtených pár	Pa
K	kavitačný parameter	-