

# Ultrazvučno mjerenje protoka

---

**Odović, Tin**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:841625>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-18**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
**TEHNIČKI FAKULTET**  
Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**ULTRAZVUČNO MJERENJE PROTOKA/ULTRASONIC FLOW  
MEASUREMENT**

Rijeka, svibanj 2023.

Tin Odović  
0069084364

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
**TEHNIČKI FAKULTET**  
Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**ULTRAZVUČNO MJERENJE PROTOKA/ULTRASONIC FLOW  
MEASUREMENT**

Mentor: Prof. dr. sc. Lado Kranjčević

Rijeka, svibanj 2023.

Tin Odović  
0069084364

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam prema članku 8. Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku studija preddiplomskog sveučilišnog studija Tehničkog fakulteta u Rijeci, samostalno izradio završni rad pod naslovom „Ultrazvučno mjerenje protoka“ pod vodstvom prof. dr. sc. Lade Kranjčevića.

## **ZAHVALA**

Prije svega zahvaljujem se svome mentoru prof. dr. sc. Ladi Kranjčeviću na mentorstvu i vodstvu pri izradi ovog završnog rada. Veliko hvala asistentu Luki Grbčiću koji je uvijek bio na raspolaganju pri pomoći oko izvršavanja eksperimentalnog dijela završnog rada. Zahvaljujem se svojim prijateljima a ponajviše svojoj obitelji na potpori kroz sve godine školovanja.

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. PROTOK I MJERENJE PROTOKA .....	2
2.1 Mehanika fluida i mjerenje protoka.....	2
2.2 Vrste protoka .....	3
2.3 Vrste protokomjera .....	4
3. ULTRAZVUČNI PROTOKOMJERI .....	6
3.1 Ultrazvučni protokomjer.....	6
3.2 Vrste ultrazvučnih protokomjera .....	7
3.2.1 Ultrazvučni protokomjeri frekvencijskog pomaka .....	7
3.2.2 Ultrazvučni protokomjeri vremena prolaza .....	7
4. VIŠESTRUKA PITOTOVA CIJEV .....	9
4.1 Pitotova cijev .....	9
4.2 Princip mjerenja brzine fluida pomoću Pitotove cijevi .....	10
4.3 Razne primjene Pitotove cijevi.....	11
5. LABORATORIJSKO MJERENJE PROTOKA .....	14
6. ANALIZA DIJELA ZATVORENOG KRUGA U OPEN-SOURCE SOFTVERU .....	20
7. ZAKLJUČAK .....	24
8. LITERATURA.....	25
POPIS SLIKA .....	26
POPIS TABLICA.....	27
SAŽETAK.....	28
ABSTRACT .....	29

## 1. UVOD

Mehanika fluida grana je klasične fizike s primjenama od velike važnosti u hidrauličkom i aeronautičkom inženjerstvu, kemijskom inženjerstvu, meteorologiji i zoologiji. Jedno od glavnih područja primjene mehanike fluida zapravo je mjerenje protoka. Tema koju ćemo obraditi u ovome završnom radu odnosi se na mjerenje protoka fluida pomoću ultrazvučnog protokomjera. Kroz rad se objašnjavaju vrste protoka i vrste protokomjera te njihova široka upotreba. Laboratorijski dio završnog rada odrađen je na Tehničkom fakultetu u Rijeci. Mjerio se protok u zatvorenom krugu te su dobivene vrijednosti za različiti raspon protoka zapisane u tablicama. Mjerenje je također potkrijepljeno slikama. Protok se mjerio isključivo pomoću W metode zbog malog promjera PVC cijevi. Koristio se i *open-source* softver kako bi se napravila analiza protoka za dio zatvorenog kruga. Prikazane su neke od mogućnosti tog programa.

## 2. PROTOK I MJERENJE PROTOKA

### 2.1 Mehanika fluida i mjerenje protoka

Mehanika fluida ili hidromehanika dio je fizike koji proučava zakone ravnoteže i strujanje fluida pri čemu se njihova molekularna građa zanemaruje, odnosno njih smatramo neprekidnima. Takvi zakoni vrijede za tekućine i plinove dokle god je stišljivost plinova zanemariva.

Hidromehanika je znanstvenu podlogu dobila u 18. stoljeću usprkos nastojanjima da se opišu zakoni gibanja tekućine koji sežu u najdalju prošlost. Najranije je razvijena klasična mehanika fluida, kojoj je predmet proučavanja idealna ili savršena tekućina, tj. tekućina bez trenja (viskoznosti). No ipak, dobivene rezultate nisu se mogli upotrijebiti u praksi ponajviše zbog trenja koje ne smije biti zanemarivo. Iz tog razloga inicijativa znanstvenika usmjerena je na to da se odrede prirodni zakoni koji opisuju realne fluide (hidraulika). [1]

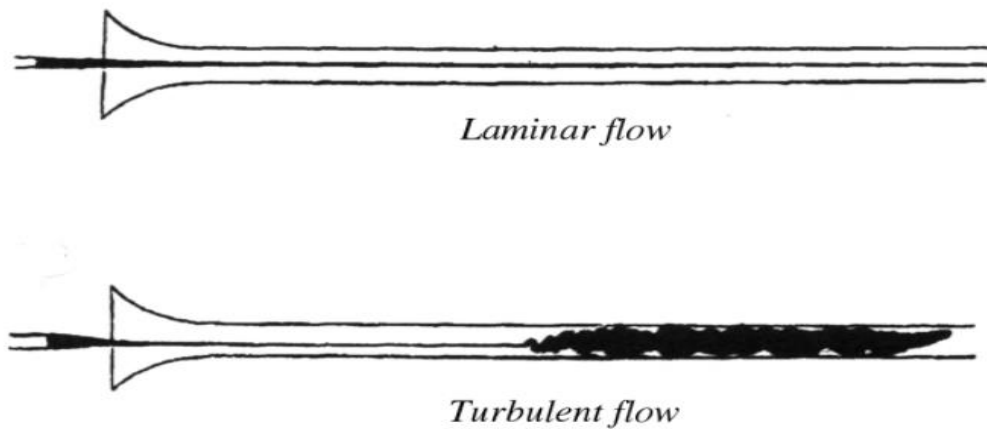


*Slika 2.1. Površinska napetost [1]*

Mjerenje protoka bitan je dio svakog proizvodnog procesa te je jedna od najčešće mjerenih fizičkih veličina u industriji. Nadalje, sama produktivnost nekog procesa u proizvodnji direktno ovisi o podacima dobivenim prilikom mjerenja protoka. Također, promjenom protoka se najčešće upravlja samim proizvodnim procesima.

Mjerenje protoka najčešće se koristi za mjerenje određenog svojstva fluida. Fluidi čiji se protok najčešće mjeri su tekućine, plinovi te mješavine tekućina i krutine. Tekućine su najlakše mjerljive jer su nestlačive, dok su plinovi stlačivi stoga njihovo mjerenje zahtjeva dodatne korekcije koristeći tlakove i temperature. Brzina tekućine u cijevi mijenja se položajem i vremenom, a razlikujemo laminarno i turbulentno protjecanje pri čemu je puno lakše mjeriti laminarno protjecanje. Nadalje, kada govorimo o mješavinama tekućina i krutina možemo reći da se one klasificiraju kao tekućine s raspršenim krutim česticama, a primjer takvih mješavina je blato pa i prozirne tekućine koje sadrže velike čestice krutih tvari. [2]





Slika 2.2. Laminarno i turbulentno strujanje [3]

## 2.2 Vrste protoka

Protok (oznaka  $Q$  ili  $q$ ) je fizikalna veličina koja opisuje količinu nekoga fluida npr. tekućine ili plina koji protječu nekim presjekom u vremenskom intervalu. Dijelimo ga na volumetrijski protok i na maseni protok. Volumni ili volumetrijski protok fizikalna je veličina koja određuje obujam (volumen) fluida koji prolazi nekom točkom u određenom vremenu. Volumni protok se određuje kao:

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (2.1) \text{ gdje je:}$$

$Q$  - volumni protok ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$\Delta V$  - promjena obujma fluida ( $\text{m}^3$ )

$\Delta t$  - vrijeme trajanja toka fluida

Maseni protok ( $\text{kg}/\text{s}$ ) je masa fluida koja prolazi nekom točkom u određenom vremenu. Maseni protok opisan je jednadžbom:

$$\dot{m} = \rho v \cdot A = \rho Q = j_m \cdot A \quad (2.2) \text{ gdje je:}$$

$\rho$  - gustoća fluida ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$v$  – brzina fluida u cijevi ( $\text{m}/\text{s}$ )

$A$  – presjek cijevi ( $\text{m}^2$ )

$Q$  - volumni protok ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$j_m$  - maseni fluks [3]

### 2.3 Vrste protokomjera

Ovaj završni rad baziran je na mjerenju protoka koristeći ultrazvučni protokomjer, no, važno je navesti i druge osnovne vrste protokomjera. Prema tome razlikujemo mehaničke, tlačne, električne te masene protokomjere. Mehanički protokomjeri ili mehanički mjerači protoka mogu biti rotametri, mjerne turbine ili ostali rotacijski protokomjeri. [4]



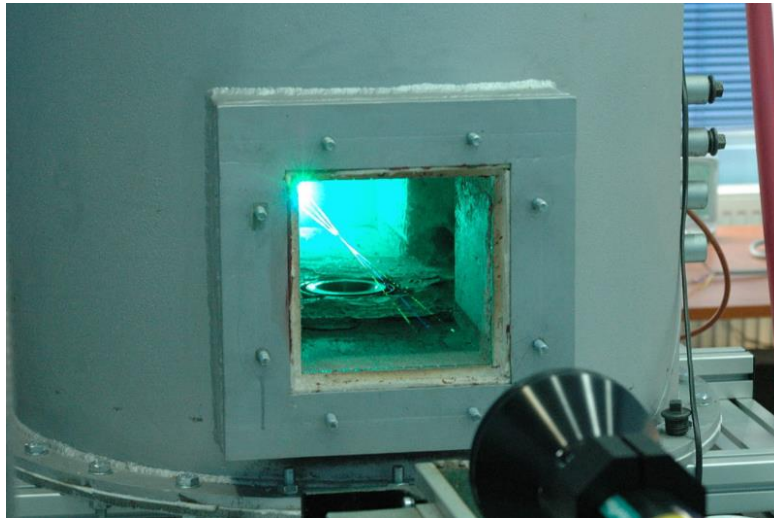
*Slika 2.3. Rotametar [2]*

Tlačni protokomjeri mogu biti: mjerna prigušnica, Dallove i Venturijeve cijevi, hidrometar i pitotova cijev. Ako u cijevi kroz koju fluid protječe postoji suženje, javiti će tlak različit od onog na mjestima bez suženja. Isti će ovisiti o samom volumnom protoku tekućine. [5]



*Slika 2.4. Hidrometar [2]*

Primjeri električnih ili elektroničkih protokomjera su vrtložni, elektromagnetski, ultrazvučni, Dopplerov protokomjer i laserski Dopplerov protokomjer.



*Slika 2.5. Laserski Dopplerov protokomjer [2]*

Što se tiče mjerenja protoka u otvorenim kanalima koristi se kroskorelacijska metoda koja se smatra primarnom i najjednostavnijom metodom mjerenja protoka. Glavno sredstvo je marker kojim se označava željeni fluid te se mjeri ukupno vrijeme prolaska markera između dvije kontrolne točke na poznatoj udaljenosti. Pomoću dobivenog vremena i udaljenosti između točaka možemo dobiti brzinu fluida i protok ukoliko nam je poznata površina presjeka, a uz poznatu površinu presjeka kanala. [6]

U masene protokomjere ubrajamo Coriolisov protokomjer, termodinamički protokomjer, protokomjer s vrućom žicom.

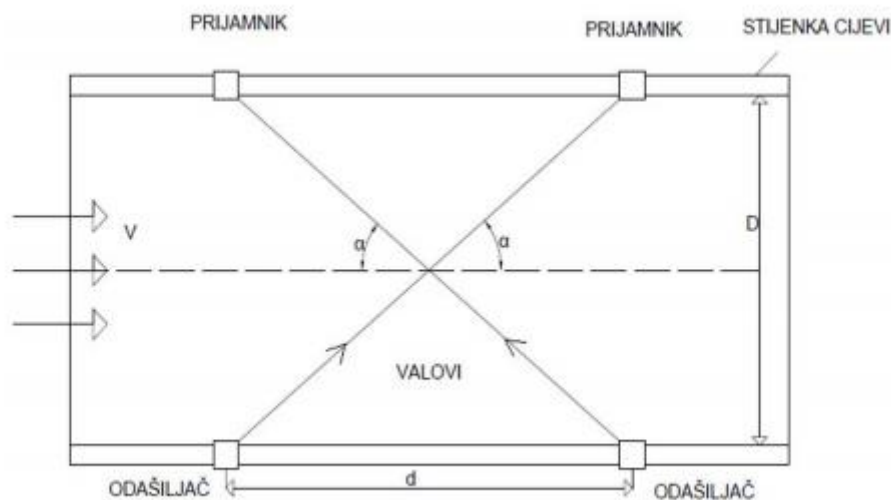


*Slika 2.6. Coriolisov protokomjer [2]*

### 3. ULTRAZVUČNI PROTOKOMJERI

#### 3.1 Ultrazvučni protokomjer

Ultrazvuk možemo opisati kao zvučni val čija je frekvencija iznad gornje granice osjetljivosti ljudskog uha. Funkcija i način mjerenja ultrazvučnog protokomjera zasniva se na činjenici da se ultrazvučni val rasprostire brže niz struju, nego uz struju fluida. Uređaj zapravo mjeri razliku vremena gibanja ultrazvuka niz i uz struju. Iz tog razloga, mjerni pretvarač protoka ove vrste sadrži dva para odašiljača i prijarnika što je vidljivo na slici broj 3.1.



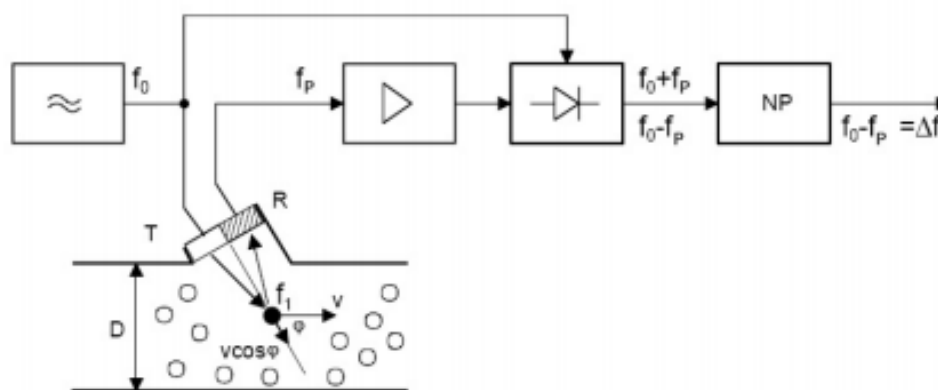
Slika 3.1. Prikaz rada ultrazvučnog mjernog pretvarača protoka [5]

Mjeri se vrijeme potrebno da valovi prođu kroz cijev pri čemu razlika njihovih vremena daje brzinu protjecanja. Ukoliko se radi o sinusoidalnim valovima, kašnjenje se opisuje kao fazni pomak. U konačnici, brzina se izračunava pomoću računala koje preračunava podatke koje smo mu zadali. Iz razloga što se valovi kreću ukoso u odnosu na sam fluid, u obzir se uzima vodoravna komponenta vala. Prednosti ultrazvučne metode su visoka točnost, brzi odziv, neometano protjecanje fluida te lineranost. K tome, ova je metoda primjenjiva na različitim vrstama fluida.

## 3.2 Vrste ultrazvučnih protokomjera

### 3.2.1 Ultrazvučni protokomjeri frekvencijskog pomaka

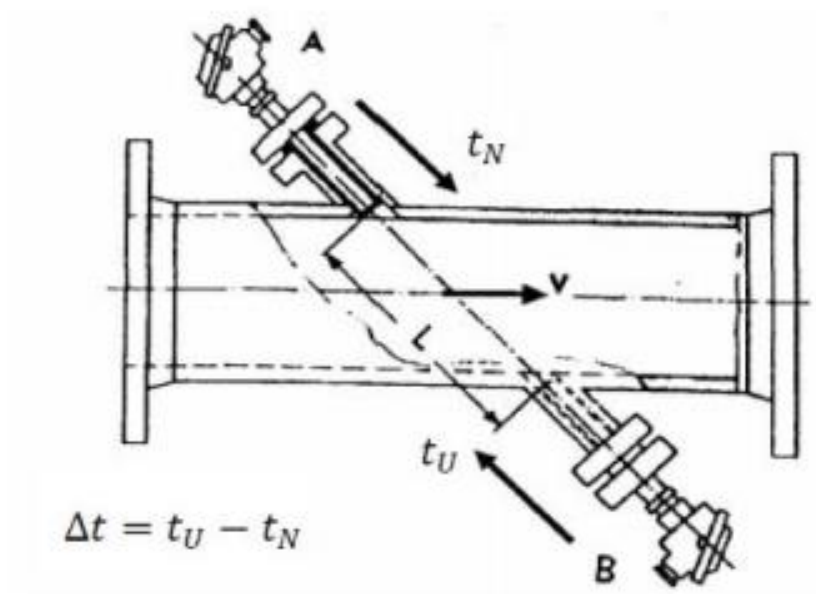
Ovakav tip uređaja primjenjuje se kada tekućina sadrži sitne krute čestice, mjehuriće ili čak vrtlog koji mogu reflektirati ultrazvuk. Polazi se od toga da tekućina mora sadržavati barem 25 ppm krutih čestica veličine oko  $30\ \mu\text{m}$  kako bi reflektiranje ultrazvučnog signala bilo uspješno (slika 3.2.). Uređaj sadrži dvije mjerne sonde od kojih se jedna koristi kao predajnik (odašiljač), a uloga joj je da šalje visoku i konstantnu ultrazvučnu frekvenciju. Ta frekvencija posljedica je signala reflektiranog od krutih čestica ili mjehurića plinova te se kao takva registrira na prijemu, odnosno drugoj sondi. Relativno gibanje čestica u fluidu rezultira kompresijom ultrazvuka, pri čemu se njegova valna duljina smanjuje, a frekvencija raste.



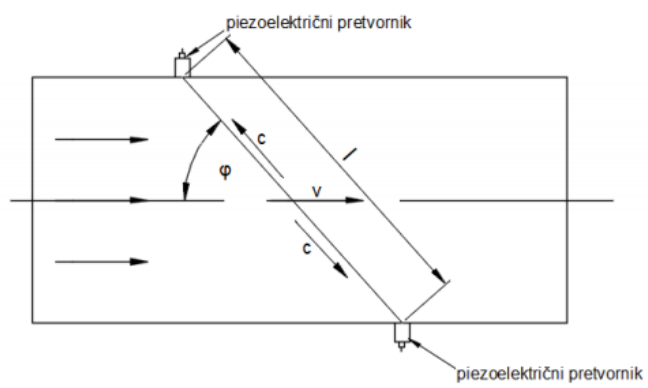
Slika 3.2. Ultrazvučno mjerilo protoka [7]

### 3.2.2 Ultrazvučni protokomjeri vremena prolaza

Ultrazvučni protokomjeri vremena prolaza (slika 3.3.) koriste se pri mjerenju volumnog protoka čistih kapljevina. Ultrazvuk ima različito vrijeme prolaska niz struju i uz struju te se na osnovi mjerenja tog vremena zaključuje o smjeru i brzini strujanja. Polazi se od pretpostavke da je brzina rasprostiranja ultrazvučnog vala  $c$  znatno veća od brzine protjecanja fluida  $v$ . Ultrazvučni protokomjeri ugrađuju se s unutarnje i vanjske strane cijevi, a postavljaju se na mjesto gdje postoji izraženi profil strujanja. Za mjerenje su potrebna dva piezoelektrična pretvornika postavljena na određenu udaljenost na cijevi (slika 3.4.). Oba pretvornika i odašilji i primaju signale. [7]



Slika 3.3. Ultrazvučni protokomjer vremena prolaza [7]



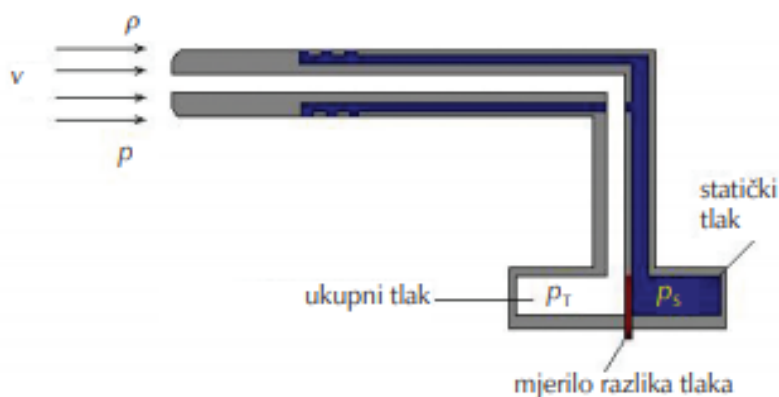
Slika 3.4. Piezoelektrični pretvornici [5]

## 4. VIŠESTRUKA PITOTOVA CIJEV

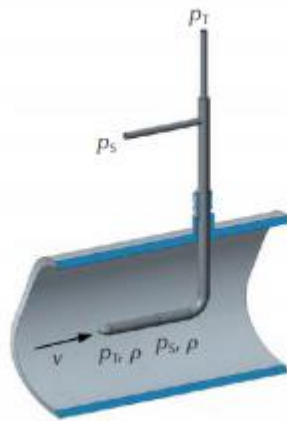
### 4.1 Pitotova cijev

Pitotova cijev (slika 4.1.) je uređaj koji za razliku od ultrazvučnih protokomjera mjeri brzinu strujanja u određenoj točki. Njom se mjeri tlak koji nastaje kada se tekućina zaustavlja na fiksnoj točki u toku. [8] Ime je dobila po francuskom fizičaru Henriju Pitotu a naziva se još i Prandtl-Pitotova cijev po njemačkom fizičaru Ludwigu Prandtlu. Uređajem se mjeri brzina toka temeljena na razlici tlaka zastoja i statičkog tlaka koji se generiraju u toku tekućine kao posljedica samog oblika cijevi. Pitotova cijev može se opisati kao uska i duga cijev kojoj se ulazni otvor stavlja u tok tekućine, a drugi kraj spaja na mjerač tlaka. Statički ( $p_s$ ) i brzinski tlak ( $p_v$ ) mjere se pomoću plašta cijevi koji sadrži rupice. Uz Pitotovu cijev postoji još jedna koja je savijena okomito naspram smjera strujanja na ulaznom otvoru. Zbog okomitog koljena dolazi do zaustavljanja čestica prilikom prolaza tekućine, stoga se tlak zastoja ( $p_T$ ) mjeri na drugom kraju. Razlika tlaka (diferencijalni tlak) na ulazu u Pitotovu cijev zapravo je mjera brzine koju je moguće odrediti za tekućine poznate gustoće. Ukupni tlak mjeri se na vrhu cijevi, a statički tlak na rupicama koje su izbušene pod pravim kutom naspram smjera protoka na površini Pitotova plašta. Mjerenje brzine tekućine  $v$  računa se prema jednadžbi:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_t - p_s)}{\rho}} \quad (4.1)$$



Slika 4.1. Funkcionalni presjek Pitotove cijevi [8]

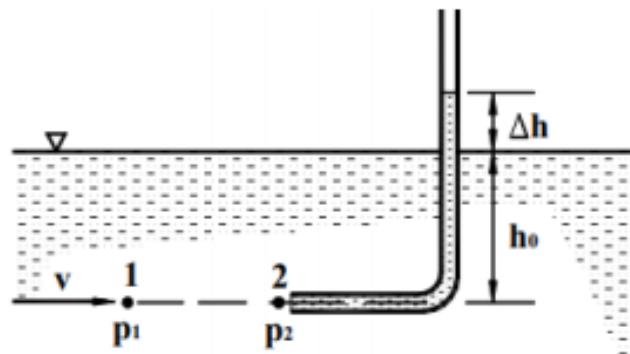


Slika 4.2. Pitotova cijev ugrađena u cjevovod

Međutim, nedostaci primjene Pitotove cijevi leže u tome što se tlak mjeri isključivo u jednoj točki ukoliko nema poprečnog kretanja po cijevima, čineći ovu metodu neprikladnom za primjenu u industriji. Nadalje, struktura same cijevi nema dovoljnu čvrstoću za protoke u većim cijevima. Posljedično dolazi do razvitka modificirane Pitotove cijevi.

#### 4.2 Princip mjerenja brzine fluida pomoću Pitotove cijevi

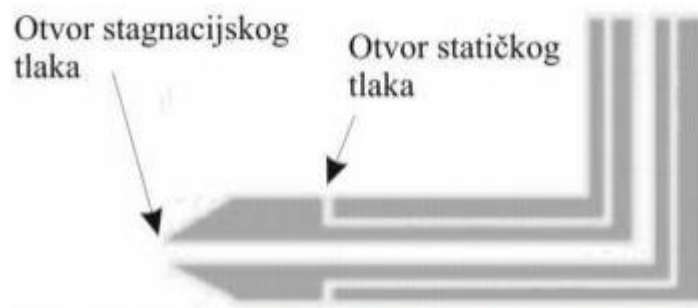
Način na koji Pitotova cijev mjeri brzinu vidimo na slici (4.3.) gdje je zadana cijev savinuta pod pravim kutem i usmjerena u pravcu strujanja fluida. Fluid naletava direktno na otvor cijevi što rezultira povećanjem tlaka koji će rasti sve dok se ne izjednači s tlakom djelovanja fluida. Neposredno ispred otvora cijevi nalazi se točka 2 u kojoj fluid miruje, a naziva se stagnacijska ili zaustavna točka.



Slika 4.3. Princip mjerenja brzine fluida pomoću jednostavne Pitotove cijevi [4]



Na slici 4.4. prikazan je presjek Pitotove cijevi koja mjeri stagnacijski i statički tlak. Izlazni vodovi cijevi spojeni su na diferencijalni manometar koji prikazuje razliku stagnacijskog i statičkog tlaka, odnosno dinamički tlak pomoću kojeg se računa brzina strujanja.



Slika 4.4. Pitotova cijev mjeri stagnacijski i statički tlak [4]

### 4.3 Razne primjene Pitotove cijevi

Jedna od primjena Pitotove cijevi u svakodnevnom životu može se uočiti na zrakoplovima kojima ovaj uređaj služi za mjerenje brzine. Primjer je vidljiv na slici 4.5. gdje se Pitotova cijev koristi kao ulaz statičkog tlaka na koji je spojena lopatica. Smjer zraka je s desna na lijevo odnosno od cijevi do lopatice.



Slika 4.5. Pitotova cijev na zrakoplovu [8]

Pitotova cijev se također koristi i na bolidima formule F1. F1 timovi postavljaju Pitotove cijevi u područja u kojima žele mjeriti brzinu zraka. Na nekim test sesijama Pitot će biti na nosu, a na drugima će biti visoko iznad zračne kutije motora. [9] Koristi se i na helikopteru Kamov Ka-26 kao što je vidljivo na slikama 4.7. i 4.8.



*Slika 4.6. Pitotova cijev na formuli [9]*



*Slika 4.7. Helikopter Kamov Ka-26 [8]*



*Slika 4.8. Pitot cijev na helikopteru [8]*

Koristi se kao i vremenski instrument na zvjezdarnici Mount Washington. Pitotov statički anemometar je s desne strane.



*Slika 4.9. Pitotov statički anemometar [8]*

## 5. LABORATORIJSKO MJERENJE PROTOKA

Laboratorij u kojem se provodilo mjerenje nalazi se na Tehničkom fakultetu u Rijeci. Zatvoreni krug sastoji se od cijevi, pumpe, kade s vodom, dva mjeraca protoka, jednim ugrađenim u stroju i kontrolnog mjeraca protoka. U ovom slučaju kontrolni mjerac bio je ultrazvučni mjerac protoka omega model FDT -21 (slika 5.1.).



*Slika 5.1. Ultrazvučni mjerac protoka*

Za početak eksperimenta uključujemo sustav i punimo kadu (slika 5.2.) s vodom do određene mjere, s otprilike 11 litara vode. Spojili smo mjerne elemente (slika 5.3.) i cijevi prema zadanim uputama. Protok se odvija s dva mjerna uređaja i jednim ugrađenim uređajem u stroju.



*Slika 5.2. Kada napunjena vodom*

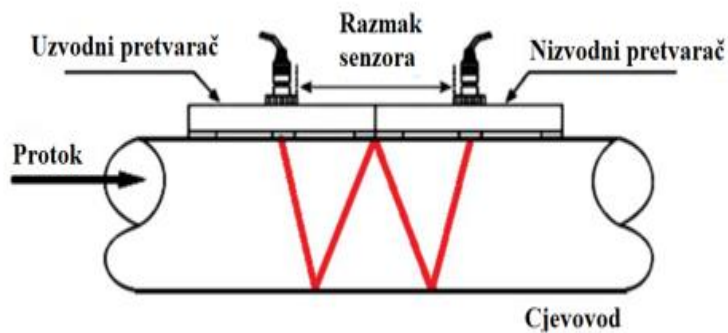


*Slika 5.3. Mjerni uređaji*

Prema uputama asistenta spajamo ultrazvučni protokomjer. Na donju stranu pretvarača nanosimo ultrazvučni kontakti gel bez kojega mjerenje ne bi bilo moguće. S obzirom da je promjer PVC cijevi 22 mm, odabrana je W metoda.



Slika 5.4. Ultrazvučni kontaktni gel

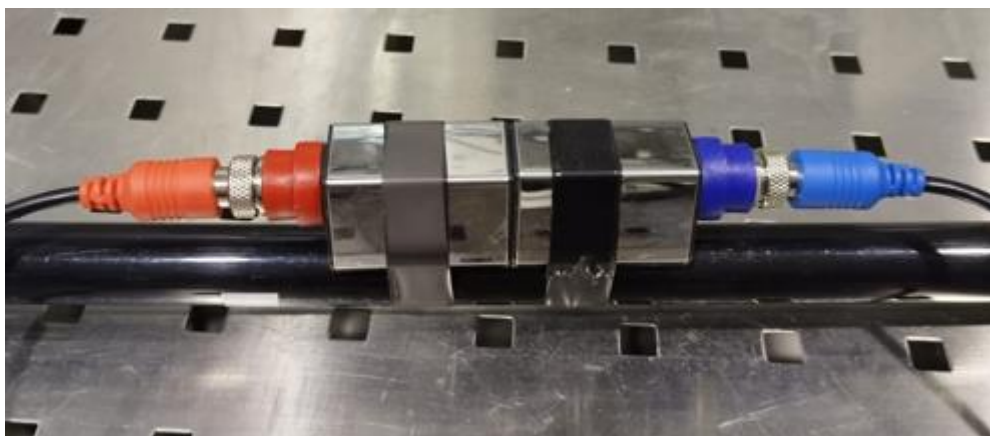


Slika 5.5. W metoda

Radi točnog izračuna protoka treba pripaziti na položaj postavljanja pretvarača. Crveni pretvarač uvijek se postavlja u smjeru protoka dok se plavi pretvarač postavlja suprotno (slika 5.7.). Nakon pravilnog postavljanja pretvarača pomoću ljepljive trake ih učvršćujemo na cijev.



Slika 5.6. Pretvarači



*Slika 5.7. Pravilno postavljene pretvarači na PVC cijev*

Nakon što smo pravilno postavili ultrazvučni mjerač protoka i sve elemente zatvorenog kruga moramo unijeti ulazne podatke koji se nalaze u tablici 5.1.

*Tablica 5.1. Ulazni podaci*

Ulazni podaci:	
Unutarnji promjer	18 mm
Vanjski promjer	22 mm
Duljina stijenke	2 mm
Fluid	voda
Materijal cijevi	PVC

Kroz zatvoreni krug na kojemu se obavljao eksperiment je tekla voda čiji smo protok mijenjali pomoću glavnog ventila. Također su u zatvorenom krugu spojene pumpa M1, pumpa kade i pumpa M2 koja se nije koristila zbog kvara. Za prvo mjerenje je protok bio maksimalan te smo očitavali vrijednosti koje dobivamo kada u sustavu rade pumpa M1 i pumpa kade zajedno, samo pumpa M1 i samo pumpa kade. Proces mjerenja s različitim pumpama u radu se ponavljao s srednjim protokom i minimalnim protokom. U eksperimentu se koristila W metoda mjerenja. Izmjerene vrijednosti su dane u sljedećim tablicama 5.2., 5.3. i 5.4.

*Tablica 5.2. Vrijednosti za maksimalan protok*

<b>Maksimalan protok</b>	Ultrazvučni protokomjer		Mjerni uređaj 1	Mjerni uređaj 2
	Protok Q [l/s]	Brzina v [m/s]	Protok Q [l/s]	Protok Q [l/s]
Pumpa M1 i pumpa kade	0,2374	0,8833	0,2485	0,2503
Pumpa M1	0,2225	0,8277	0,2357	0,2363
Pumpa kade	0,1015	0,3777	0,0953	0,0950

*Tablica 5.3. Vrijednosti za srednji protok*

<b>Srednji protok</b>	Ultrazvučni protokomjer		Mjerni uređaj 1	Mjerni uređaj 2
	Protok Q [l/s]	Brzina v [m/s]	Protok Q [l/s]	Protok Q [l/s]
Pumpa M1 i pumpa kade	0,1201	0,4469	0,1200	0,1190
Pumpa M1	0,0968	0,3602	0,0956	0,0953
Pumpa kade	0,0295	0,1100	0,0253	0,0252

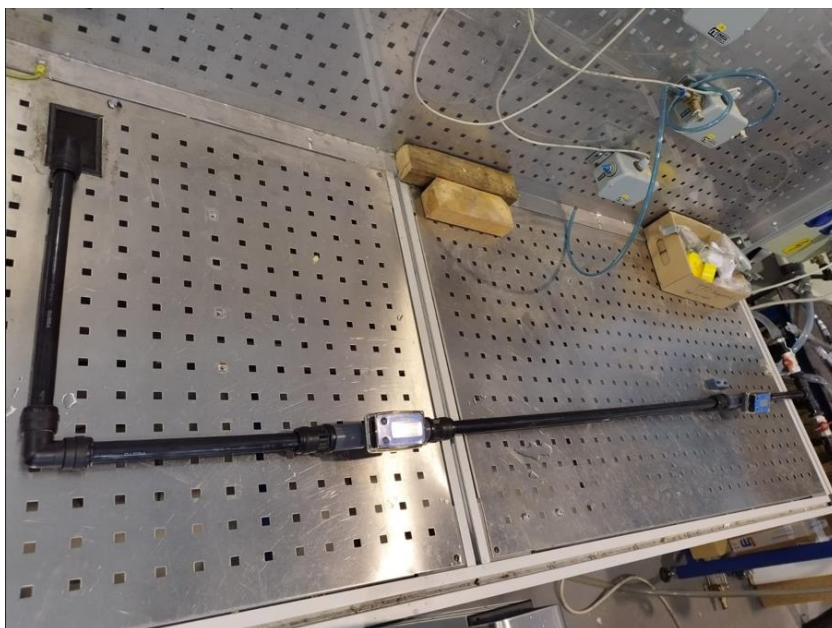


*Tablica 5.4. Vrijednosti za minimalan protok*

<b>Minimalan protok</b>	Ultrazvučni protokomjer		Mjerni uređaj 1	Mjerni uređaj 2
	Protok Q [l/s]	Brzina v [m/s]	Protok Q [l/s]	Protok Q [l/s]
Pumpa M1 i pumpa kade	0,0825	0,3050	0,0812	0,0810
Pumpa M1	0,0518	0,1828	0,0481	0,0479
Pumpa kade	0,0305	0,1152	0,0303	0,0302

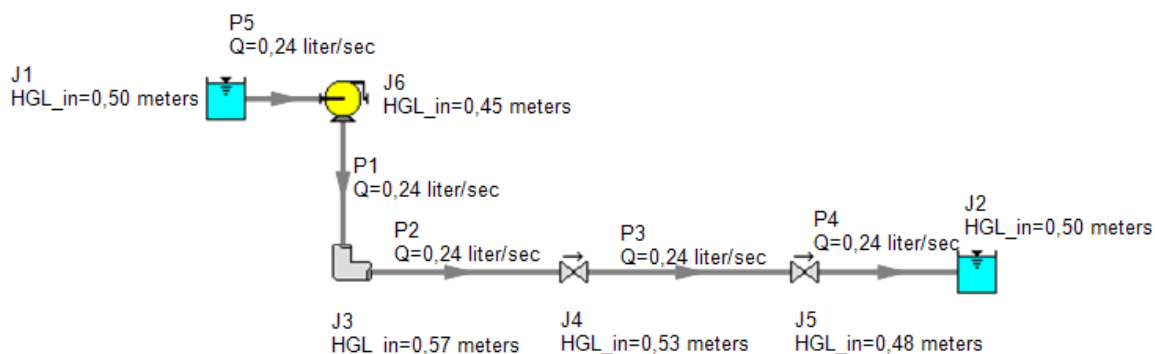
## 6. ANALIZA DIJELA ZATVORENOG KRUGA U OPEN-SOURCE SOFTVERU

Osim laboratorijskog dijela, u ovom završnom radu koristio se i računalni program Applied Flow Technology (AFT) Fathom 9 u kojemu smo konstruirali dio zatvorenog kruga prikazan na slici 6.1. AFT Fathom 9 softver je za simulaciju dinamike fluida, koji se koristi za izračunavanje pada tlaka i distribucije protoka u cijevima u tekućim i plinskim cjevovodima i sustavima kanala. [10]



*Slika 6.1. Dio zatvorenog kruga*

U početku smo u programu nacrtali spoj prikazan na slici u mjerilu 1:1. Svaki dio toga spoja se trebao definirati (duljina, debljina stijenke, unutarnji promjer, vanjski promjer, vrsta materijala). U ovom slučaju smo na početak postavili pumpu kojoj smo zadali protok isti kao i kod laboratorijskog mjerenja kod maksimalnog protoka kako bi simulirali protok vode kroz dio zatvorenog kruga. Pumpa je povlačila vodu iz spremnika 1. Iz vrijednosti u tablicama vidimo lagani pad protoka kod „L“ spoja. Umjesto dva mjerača protoka koji su se koristili u laboratoriju postavljeni su jednosmjerni nepovratni ventili kako bi simulacija bila što sličnija jer program sam po sebi u svakoj točki zatvorenog kruga mjeri protok i ostale parametre.



Slika 6.2. Prikaz modela u programu

Sve cijevi u programu su kao što smo već napomenuli nacrtane u mjerilu 1:1, te su njihove dimenzije prikazane u sljedećoj tablici na slici 6.3. koja je izvučena iz programa.

Pipes

Pipe	Name	Pipe Defined	Length	Length Units	Hydraulic Diameter	Hydraulic Diam. Units	Friction Data Set	Roughness	Roughness Units	Losses (K)
1	Pipe	Yes	43 cm		18,1864 mm		Standard	0,0001524 cm		0
2	Pipe	Yes	34 cm		18,1864 mm		Standard	0,0001524 cm		0
3	Pipe	Yes	90,00003 cm		1,81864 cm		Standard	0,0001524 cm		0
4	Pipe	Yes	31,5 cm		1,81864 cm		Standard	0,0001524 cm		0
5	Pipe	Yes	0,1 meters		1,81864 cm		Standard	0,0001524 cm		0

Pipe	Initial Flow	Initial Flow Units	Junctions (Up,Down)	Geometry	Material	Size	Type	Special Condition
1			6, 3	Cylindrical Pipe	PVC - ASTM	1/2 inch	SDR13.5	None
2			3, 4	Cylindrical Pipe	PVC - ASTM	1/2 inch	SDR13.5	None
3			4, 5	Cylindrical Pipe	PVC - ASTM	1/2 inch	SDR13.5	None
4			5, 2	Cylindrical Pipe	PVC - ASTM	1/2 inch	SDR13.5	None
5			1, 6	Cylindrical Pipe	PVC - ASTM	1/2 inch	SDR13.5	None

Slika 6.3. Dimenzije cijevi

Iz slike 6.4 može se isčitati vrijednost gubitka (Loss Factor K) koji rezultira padom protoka na „L“ spoju. Loss Factor (K) u tom spoju iznosi 0,3538 naspram ostalih spojeva gdje je on 0.

Jct	Name	P Static In (bar)	P Static Out (bar)	P Stag. In (bar)	P Stag. Out (bar)	Vol. Flow Rate Thru Jct (m <sup>3</sup> /hr)	Mass Flow Rate Thru Jct (kg/sec)	Loss Factor (K)
1	Reservoir	1,013	1,033	1,013	1,033	0,8546	0,2370	0,0000
2	Reservoir	1,013	1,033	1,013	1,033	0,8546	0,2370	0,0000
3	Bend	1,069	1,068	1,073	1,072	0,8546	0,2370	0,3538
4	Check Valve	1,066	1,066	1,070	1,070	0,8546	0,2370	0,0000
5	Check Valve	1,060	1,060	1,064	1,064	0,8546	0,2370	0,0000
6	Pump	1,057	1,072	1,062	1,076	0,8546	0,2370	0,0000

Slika 6.4 Loss Factor (K) na „L“ spoju

Program ima mogućnost izračunavanja raznih parametara kroz dio našeg nacrtanog zatvorenog kruga. Vrijednosti kao što su brzina, maksimalni tlak, minimalni tlak, stagnacija tlaka itd. prikazane su na slici 6.5.

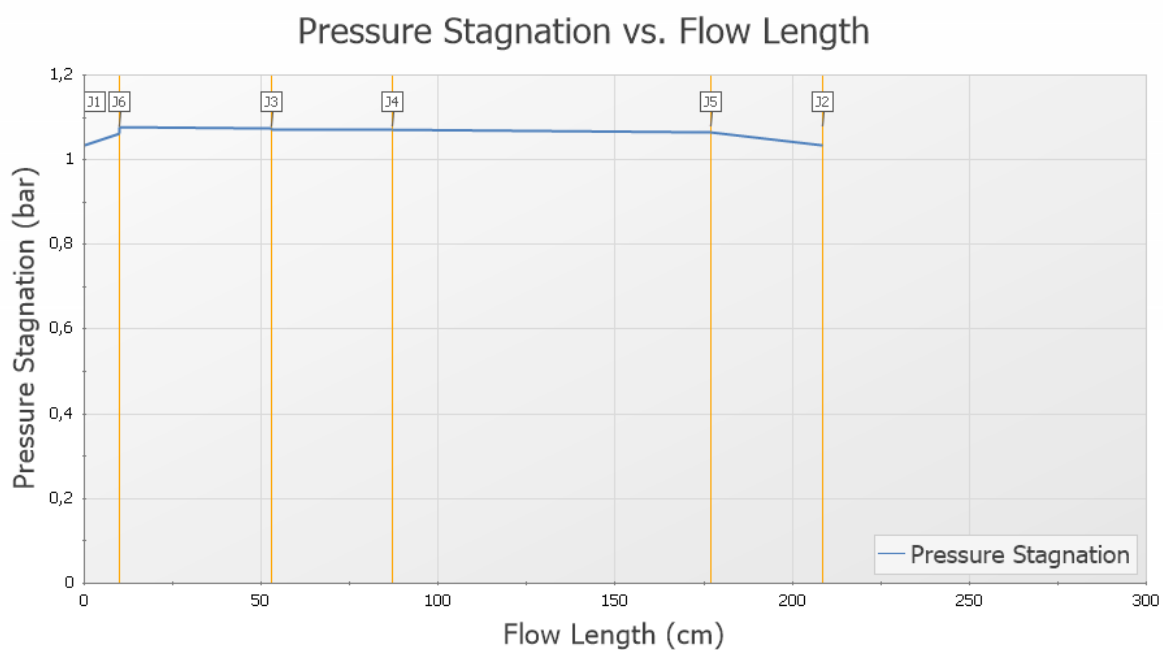
Pipe	Vol. Flow Rate (liter/sec)	Velocity (meters/sec)	Name	P Static Max (bar)	P Static Min (bar)	Elevation Inlet (meters)	Elevation Outlet (meters)
1	0,2374	0,9139	Pipe	1,072	1,069	0,0000	0,0000
2	0,2374	0,9139	Pipe	1,068	1,066	0,0000	0,0000
3	0,2374	0,9139	Pipe	1,066	1,060	0,0000	0,0000
4	0,2374	0,9139	Pipe	1,060	1,029	0,0000	0,3000
5	0,2374	0,9139	Pipe	1,057	1,029	0,3000	0,0000

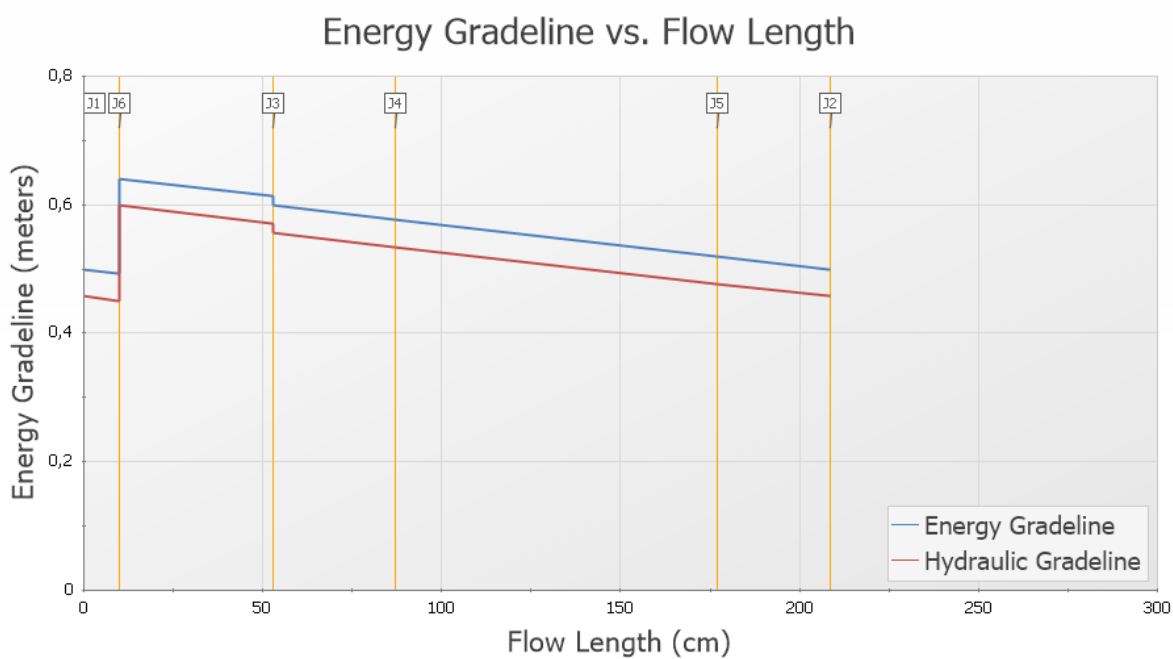
dP Stag. Total (bar)	dP Static Total (bar)	dP Gravity (bar)	dH (meters)	P Static In (bar)	P Static Out (bar)	P Stag. In (bar)	P Stag. Out (bar)
0,002675	0,002675	0,00000	0,027333	1,072	1,069	1,076	1,073
0,002115	0,002115	0,00000	0,021612	1,068	1,066	1,072	1,070
0,005600	0,005600	0,00000	0,057209	1,066	1,060	1,070	1,064
0,031324	0,031324	0,02936	0,020024	1,060	1,029	1,064	1,033
-0,028742	-0,028742	-0,02936	0,006357	1,029	1,057	1,033	1,062

Slika 6.5 Vrijednosti dobivene u programu

Također, u njemu je moguće prikazati dobivene vrijednosti kao različite vrste grafova. Mi smo prikazali stagnaciju tlaka po duljini cijevi u jednom grafu (slika 6.6.) i usporedbu energetske i hidrauličke razreda kroz cijelu dužinu cijevi u drugom grafu (slika 6.7.). Iz slike 6.6. je vidljivo kako u početku tlak raste zbog rada pumpe te dalje lagano opada kako tekućina prolazi po svakom spoju.



*Slika 6.6. Stagnacija tlaka po duljini cijevi*



*Slika 6.7. Usporedba energetskeg i hidrauličkog razreda po dužini cijevi*

## 7. ZAKLJUČAK

Kada govorimo o mjerenju protoka fluida možemo napomenuti da postoji veliki broj različitih protokomjera koji se koriste u praksi a i u svakodnevnom životu. Bitno je dobro proučiti svako svojstvo i pojedinosti određenog protokomjera kako bi on bio pravilno primijenjen. Teško je zamisliti proces opskrbe grijanja kućanstva iz toplane gdje se ne mjeri protok, jer takav sustav nebi bio od nikakve koristi niti bi bio siguran. Zapravo na svakom koraku vidimo široku upotrebu mjerača protoka, pa tako u svim kućanstvima postoje mjerači protoka za potrošnju tople i hladne vode te je njihova točnost bitna zbog samog iznosa potrošnje koju snosi potrošač. Također postoje kućanstva koja koriste ukapljeni plin za grijanje te se na isti način svakodnevno može očitati potrošnja plina. Svaka pumpna stanica s gorivom, svaki proizvodni sustav pa i potrošnja pive u nekom kafiću funkcionira na istom principu.

Zadatak ovog završnog rada bilo je ultrazvučno mjerenje protoka. Takva vrsta mjerača protoka je posebna zbog svog principa rada. Naime s vanjske strane smo postavljali pretvarače koji mjere protok bez utjecaja na unutarnji protok u cijevi. U našem slučaju koristila se PVC cijev koja je bila malog promjera pa je sam razmak između pretvarača bio malen. Eksperiment se odradio u laboratoriju Tehničkog fakulteta u Rijeci. Zatvoreni krug na kojemu se vršio eksperiment sastojao se od kade napunjene vodom, cijevi koje povezuju cijeli sustav, dviju pumpi i mjerača protoka.

U eksperimentu se koristila W metoda mjerenja protoka za različiti raspon protoka. Razmak između pretvarača iznosio je manje od 2 mm stoga su postojala lagana odstupanja naspram ultrazvučnog mjerača protoka i turbinskih mjerača protoka, no ona su zanemariva ako uzmemo u obzir mali razmak i lošiji signal. Zaključujemo da je ultrazvučni protokomjer vjerodostojan mjerač protoka te je njegova upotreba jednostavna a princip mjerenja pogodan pogotovo u sustavima kod kojih već ne postoje ugrađeni mjerači protoka unutar samih cijevi.

## 8. LITERATURA

- [1] S internet adrese: „Mehanika fluida“ , [https://hr.wikipedia.org/wiki/Mehanika\\_fluida](https://hr.wikipedia.org/wiki/Mehanika_fluida) , 19. prosinca 2021.
- [2] S internet adrese: „Mjerenje protoka“ , [https://hr.wikipedia.org/wiki/Mjerenje\\_protoka](https://hr.wikipedia.org/wiki/Mjerenje_protoka) , 2013.
- [3] S internet adrese: „Protok“ , <https://hr.wikipedia.org/wiki/Protok> , 20. prosinca 2021.
- [4] Kranjčević, L.: "Mehanika fluida" , skripta, Tehnički fakultet Rijeka, 2013.
- [5] Kovačić, R.: „MJERENJE PROTOKA“ , Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet, 2019.
- [6] Bolf, N.: „Mjerna i regulacijska tehnika“ , Kem. Ind. 68, str. 90.-93. , Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu, 2019.
- [7] Rihtarić, D.: „Vrste ultrazvučnih protokomjera“ , S interneta , [http://repositorij.fsb.hr/1247/1/10\\_02\\_2011\\_Diplomski\\_rad\\_-\\_Darijo\\_Rihtaric.pdf](http://repositorij.fsb.hr/1247/1/10_02_2011_Diplomski_rad_-_Darijo_Rihtaric.pdf) , 2011.
- [8] S internet adrese: „Pitot cijev“ , <https://hr.wikipedia.org/wiki/Pitot-cijev> , 19. prosinca 2021.
- [9] S internet adrese: „pitot tube F1“ , [http://www.formula1-dictionary.net/pitot\\_tube.html](http://www.formula1-dictionary.net/pitot_tube.html) , 2008.
- [10] S internet adrese: „AFT Fathom“ , <https://www.aft.com/products/fathom> , 1996. – 2023.

## POPIS SLIKA

*Slika 2.1. Površinska napetost [1]*

*Slika 2.2. Laminarno i turbulentno strujanje [3]*

*Slika 2.3. Rotametar [2]*

*Slika 2.4. Hidrometar [2]*

*Slika 2.5. Laserski Dopplerov protokomjer [2]*

*Slika 2.6. Coriolisov protokomjer [2]*

*Slika 3.1. Prikaz rada ultrazvučnog mjernog pretvarača protoka [5]*

*Slika 3.2. Ultrazvučno mjerilo protoka [7]*

*Slika 3.3. Ultrazvučni protokomjer vremena prolaza [7]*

*Slika 3.4. Piezoelektrični pretvornici [5]*

*Slika 4.1. Funkcionalni presjek Pitotove cijevi [8]*

*Slika 4.2. Pitotova cijev ugrađena u cjevovod [8]*

*Slika 4.3. Princip mjerenja brzine fluida pomoću jednostavne Pitotove cijevi [4]*

*Slika 4.4. Pitotova cijev mjeri stagnacijski i statički tlak [4]*

*Slika 4.5. Pitotova cijev na zrakoplovu [8]*

*Slika 4.6. Pitotova cijev na formuli [9]*

*Slika 4.7. Helikopter Kamov Ka-26 [8]*

*Slika 4.8. Pitot cijev na helikopteru [8]*

*Slika 4.9. Pitotov statički anemometar [8]*

*Slika 5.1. Ultrazvučni mjerač protoka*

*Slika 5.2. Mjerni uređaji*

*Slika 5.3. Kada napunjena vodom*

*Slika 5.4. Ultrazvučni kontaktni gel*

*Slika 5.5. W metoda*

*Slika 1.6. Pretvarači*

*Slika 5.7. Pravilno postavljeni pretvarači na PVC cijev*

*Slika 6.1. Dio zatvorenog kruga*

*Slika 6.2. Prikaz modela u programu*

*Slika 6.3. Dimenzije cijevi*

*Slika 6.4. Loss Factor (K) na „L“ spoju*

*Slika 6.5. Vrijednosti dobivene u programu*

*Slika 6.6. Stagnacija tlaka po duljini cijevi*

*Slika 6.7. Usporedba energetskog i hidrauličkog razreda po dužini cijevi*



## **POPIS TABLICA**

*Tablica 5.1 Ulazni podaci*

*Tablica 5.2 Vrijednosti za maksimalan protok*

*Tablica 5.3 Vrijednosti za srednji protok*

*Tablica 5.4 Vrijednosti za minimalan protok*

## SAŽETAK

Za ovaj završni rad „Ultrazvučno mjerenje protoka“ zadatak je bio povrh svega odraditi eksperiment u zatvorenom krugu u laboratoriju na Tehničkom fakultetu u Rijeci. Prvi dio završnog rada bavi se objašnjavanjem mjerenja protoka te vrsta protoka i protokomjera. Nakon prvog dijela objašnjavamo vrste i način rada ultrazvučnih protokomjera. Spominjemo i pitotove cijevi i njihovu široku upotrebu. U eksperimentalnom dijelu mjerimo protok na ultrazvučnom protokomjeru i turbinskim mjeracima protoka za različite podešene količine protoka. Svi rezultati eksperimenta su zabilježeni u tablicama. Koristila se isključivo  $W$  metoda mjerenja protoka. Za kraj završnog rada napravljena je simulacija za dio zatvorenog kruga u programu AFT Fathom 9.

**Ključne riječi:** mjerenje, protok, ultrazvučni protokomjer, eksperiment, simulacija, program

## **ABSTRACT**

For this final thesis "Ultrasonic flow measurement", the task was, above all, to perform an experiment in a closed circuit in the laboratory at the Technical Faculty in Rijeka. The first part of the final paper deals with the explanation of flow measurement and types of flow and flowmeters. After the first part, we explain the types and mode of operation of ultrasonic flowmeters. We also mention pitot tubes and their wide use. In the experimental part, we measure the flow on an ultrasonic flowmeter and turbine flowmeters for different adjusted flow rates. All the results of the experiment are recorded in tables. Only the W flow measurement method was used. At the end of the final thesis, a simulation was made for a part of the closed circuit in the AFT Fathom 9 program.

**Key words:** measurement, flow, ultrasonic flow meter, experiment, simulation, program