

# Mjerenje protočne količine oštrom prigušnicom

---

**Mikulaj, Petar**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2015**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:635942>

*Rights / Prava:* [In copyright/Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-05-19**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Petar Mikulaj**

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

Dr. Sc. Lovorka Grgec Bermanec, dipl. ing.

Student:

Petar Mikulaj

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Zahvaljujem se mentorici Doc. Dr. Sc. Lovorki Grgec Bermanec na ideji te njezinim smjernicama tijekom realizacije rada.

Petar Mikulaj



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Datum 25 -02- 2015 Prilog
Klasa: 602-04/15-6/3
Ur.broj: 15-1703-15-53

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Petar Mikulaj** Mat. br.: 0035186624

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mjerenje protočne količine oštrom prigušnicom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Determination of fluid flow by orifice plate measuring device**

Opis zadatka:

Za potrebe kontrolnih mjerena ili ispitivanja mjerila protoka potrebno je razraditi određivanje protočne količine oštrom prigušnicom. U radu koristiti postojeću mjernu opremu u Laboratoriju za procesna mjerena, te razmotriti mogućnosti poboljšanja zadanog mjernog sustava.

Potrebno je izraditi:

- Pregled metoda mjerena protoka
- Prikaz mjerne linije za mjerena protoka oštrom prigušnicom
- Opis postupka mjerena
- Proračun brzina strujanja i protočnih količina
- Primjer ispitivanja sa rezultatima

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
25. studenog 2014.

Rok predaje rada:  
1. rok: 26. veljače 2015.  
2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:  
1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015.  
2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	4
POPIS TABLICA.....	5
POPIS DIJAGRAMA.....	6
POPIS OZNAKA.....	7
SAŽETAK.....	8
SUMMARY .....	9
1. Uvod.....	10
2. Metode mjerjenja protoka .....	11
2.1 Podjela metoda mjerjenja protoka .....	13
2.2 Određivanje protoka mjeranjem pada tlaka na suženju.....	14
2.2.1 Mjerna prigušnica .....	15
2.2.1 Venturijeva cijev.....	18
2.2.3 Mjerna sapnica.....	21
2.2.4 Usporedba primjene mjerne prigušnice, Venturijeve cijevi i mjerne sapnice obzirom na stalni pad tlaka .....	23
3. Opis provedenih mjerjenja .....	24
3.1 Prikaz mjerne linije .....	24
3.2 Opis mjerjenja.....	25
3.2 Specifikacije uređaja korištenih tijekom mjerjenja .....	26
4. Pregled jednadžbi kod mjerjenja protočne količine pomoću oštре prigušnice prema ISO 5167-2:2003 .....	29
5. Rezultati mjerjenja.....	34
5.1. Rezultati mjerjenja za gustoću vode pri 20 °C.....	34
5.2. Rezultati mjerjenja za gustoću vode pri 25 °C.....	35
5.3. Usporedba dobivenih rezultata i rezultata dobivenih na temelju mjerjenja razlike tlaka pomoću U-cijevi .....	37
5.4. Mjerjenje protoka ultrazvučnim protokomjerom te usporedba s dobivenim rezultatima na oštroy prigušnici .....	38
6. Zaključak .....	41
7. Literatura .....	42

## POPIS SLIKA

Slika 1. Prikazi strujanja tekućine u cijevi: A) $Re < 2000$ ; B) $2000 < Re < 3000$ C) $Re > 3000$ .....	11
Slika 2. Prikaz strujnica, srednje brzine tekućine i tlaka kod protjecanja tekućine kroz mjerno suženje u cijevi.....	14
Slika 3. Mjerna prigušnica izrađena od pažljivo obrađenih i probušenih pločica koncentrično postavljenih između dvije prirubnice .....	15
Slika 4. Presjek mjerne prigušnice te raspodjela tlaka unutar cijevi .....	16
Slika 5. Venturijeva cijev .....	18
Slika 6. Presjek Venturijeve cijevi i raspodjela tlaka .....	19
Slika 7. Zavisnost koeficijenata brzine $C_v$ Venturijeve cijevi u ovisnosti o Reynoldsovom broju $Re_1$ .....	20
Slika 8. Mjerna sapnica .....	21
Slika 9. Dijagram koeficijenata protoka $C$ mjerne sapnice u ovisnosti o Reynoldsovom broju $Re_1$ ulaznog strujanja.....	22
Slika 10. Prikaz mjerne linije .....	24
Slika 11. Univerzalni sustav za duljinu DMS 680 .....	26
Slika 12. LMP/LPX 9000 .....	26
Slika 13. Mjerna prigušnica.....	27
Slika 14. Ultrazvučni protokomjer .....	28
Slika 15. Mjerna prigušnica za normu ISO 5167-2:2003 .....	32
Slika 16. Približne skice protoka, tlaka i temperature u mjernom sustavu prigušnice prema ISO 5167-2:2003 .....	33

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Vrijednosti promjera oštре prigušnice .....	27
Tablica 2. Rezultati mjerena pri temperaturi vode od 20°C.....	34
Tablica 3. Rezultati mjerena pri temperaturi vode od 25°C.....	35
Tablica 4. Izračunavanje masenog protoka iz Dijagrama 6. ....	38
Tablica 5. Izračunavanje masenog protoka iz Dijagrama 3. ....	38
Tablica 6. Rezultati mjerena ultrazvučnim protokomjerom.....	39
Tablica 7. Umjeravanje pomoću 1. koraka .....	39
Tablica 8. Umjeravanje pomoću 2. koraka .....	39

## POPIS DIJAGRAMA

Dijagram 1. Dijagram nepovratnog pada tlaka(%), za mjernu prigušnicu, mjernu sapnicu i Venturijevu cijev u ovisnosti o stupnju suženja površine protočnog presjeka u (%) .....	23
Dijagram 2. Karakteristika prigušnice prikazana ovisnošću brzine i tlaka[mbar] pri 20°C.....	34
Dijagram 3. Karakteristika prigušnice prikazana ovisnošću brzine i tlaka[mmH20] pri 20°C.....	35
Dijagram 4. Karakteristika prigušnice prikazana ovisnošću brzine i tlaka[mbar] pri 25°C.....	36
Dijagram 5.Karakteristika prigušnice prikazana ovisnošću brzine i tlaka[mmH20] pri 25°C.....	36
Dijagram 6. Karakteristika prigušnice dobivena mjeranjem razlike tlaka pomoću U-cijevi.....	37

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$q_v$	$m^3 h^{-1}$	volumni protok
$v$	$m/s$	brzina
$A$	$m^2$	površina
Re	-	Reynoldsova značajka
$\rho$	$kg/m^3$	gustoća
$\mu$	$Pa s$	dinamički viskozitet
$d$	$mm$	unutarnji promjer
D	$mm$	vanjski promjer
p	$Pa$	tlak
h	$m$	visina
$\beta$	-	omjer unutarnjeg i vanjskog promjera
$q_m$	$kg/s$	maseni protok
C	-	koeficijent protjecanja
E	-	faktor pristupne brzine
$g$	$m/s^2$	gravitacijska konstanta
$C_c$	-	koeficijent korekcije mlaza
$C_v$	-	koeficijent korekcije brzine
$\kappa$	-	izentropski koeficijent
$\varepsilon$	-	faktor ekspanzije
I	$A$	jakost struje

## SAŽETAK

Zadatak ovog rada jest razrada određivanja protočne količine oštom prigušnicom za potrebe kontrolnih mjerena i ispitivanja mjerila protoka. U radu je korištena mjerna oprema u Laboratoriju za procesna mjerena.

U radu je sistematiziran pregled metoda mjerena protoka, zatim prikazana mjerna linija za mjerene protoka oštom prigušnicom te prikaz opisa postupka mjerena. Rad se temelji na normi ISO 5167-2:2003 po kojoj smo proveli proračun mjerena. U svrhu što bolje usporedbe rezultata, uveli smo dodatno mjerene protoka pomoću ultrazvučnog protokomjera. U radu su tablično prikazana sva mjerena, dijagrami kao i proračun mjerena.

Ključne riječi: protočna količina, oštra prigušnica, brzina strujanja

## SUMMARY

The task of this thesis is to determine the flow rates with orifice plate for the purpose of control measurements and tests of flow meter. In this thesis, the measuring equipment from the Laboratory for process measurement is used.

The thesis gives systematic review of the methods of flow measurements, shows measurement line for flow measurement with orifice plate and gives the description of the measurement process. The thesis is based on ISO 5167-2:2003 on which we carry out calculation of measurement. In order to better compare results, we introduced additional flow measurement using ultrasonic flow meter. In thesis all measurements, diagrams and calculation of measurements are tabulated.

Keywords: flow rate, orifice plate, flow velocity

## 1. Uvod

Protok je jedna od osnovnih fizikalnih veličina koja se mjeri u industrijskom pogonu. Mjerenjem protoka određuju se energetske i materijalne bilance na osnovu kojih se određuje produktivnost procesa proizvodnje. Istovremeno protok je najčešće i osnovna veličina čijom se promjenom upravlja procesom proizvodnje. Mjerenje protoka kapljevinama, plinova, višefaznih tekućina i suspenzija je složeno, podložno je brojnim pogreškama, i zato je razvijen veliki broj različitih mjernih postupaka u svrhu preciznog i pouzdanog mjerjenja.

Potreba za mjerjenjem protoka dolazi još iz Aleksandrije kada je Hero 150. pr. Kr. predložio shemu reguliranja protoka vode u kojoj je sifon bio priključen na spremnik s konstantnom razinom. U dalnjem razvoju Rimljani razvijaju složene sustave opskrbe vodom u javnim kupalištima ali i u privatnim kućama te jasno razumiju vezu između protoka i veličine cijevi. Poprečni presjek glinenih cijevi se koristio za mjerjenje dostave vode u zgradama.

Leonardo da Vinci je prvi predložio princip održanja mase i energije ustanovivši da su površina, brzina i protok povezani. Isaac Newton, Daniel Bernoulli i Leonard Euler su razvili matematičke i fizičke osnove na kojima su se kasnije razvili mjerači protoka.

1887. godine Herschel konstruirao prvu Venturijevu cijev, a 1896. Max Gehre je patentirao mjernu prigušnicu te komercijalna upotreba započinje 1909. Uskoro nakon toga tvrtke za proizvodnju ulja i distribuciju nafte započinju njihovu upotrebu zbog niske cijene i lakog održavanja.

## 2. Metode mjerjenja protoka

Na početku ćemo definirati osnovne veličine protoka:

- Volumni protok ( $m^3 h^{-1}$ ), ( $L s^{-1}$ ),..
- Maseni protok ( $kgs^{-1}$ ), ( $th^{-1}$ ),...
- Molarni protok ( $mol s^{-1}$ ), ( $mol h^{-1}$ ),..

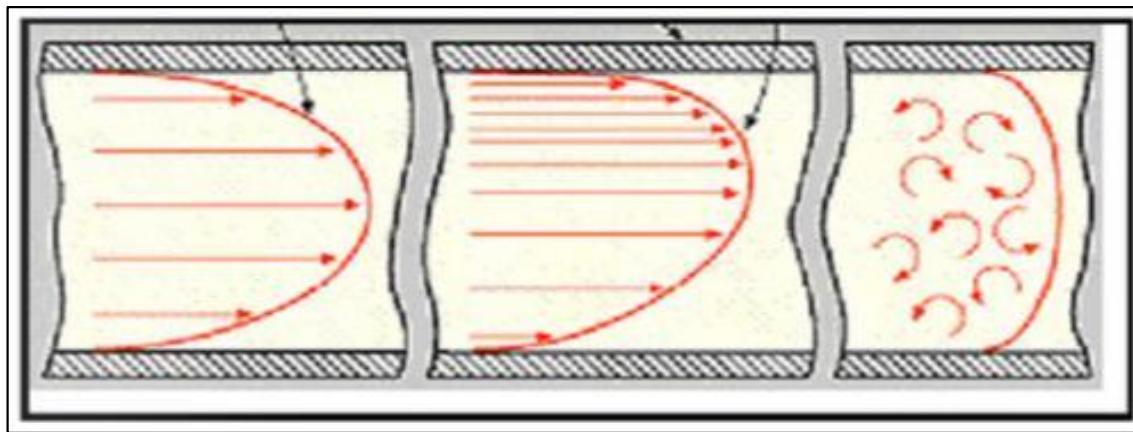
Volumni protok u cijevi definiran je limesom omjera volumena tekućine koja protjeće kroz presjek cijevi u intervalu vremena kada interval postaje beskonačno mali:

$$q_v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta V}{\Delta t} \right)$$

Na isti način su definirani maseni i molarni protok. Srednja brzina tekućine definirana je omjerom volumnog protoka i površine presjeka cijevi:

$$v = \frac{q_v}{A}$$

Brzina tekućine u cijevi mijenja se položajem i vremenom. Bitno se razlikuje laminarno od turbulentnog protjecanja.



Slika 1. Prikazi strujanja tekućine u cijevi: A)  $Re < 2000$ ; B)  $2000 < Re < 3000$  C)  $Re > 3000$

Na slici 1. prikazano je laminarno, prijelazno i turbulentno strujanje. Oblik strujanja u šupljoj cijevi jednoznačno je određen Reynoldsovom značajkom koja je definirana izrazom:

$$Re = \frac{\text{inerčijske sile}}{\text{viskozne sile}} = \frac{\rho v d}{\mu}$$

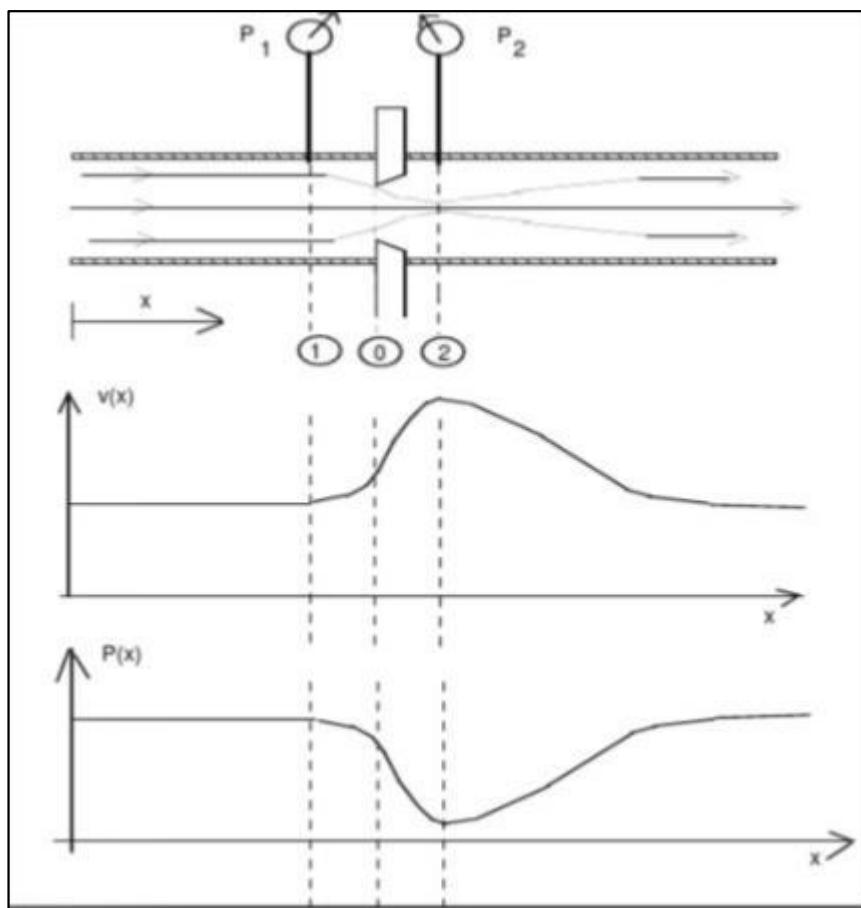
Mjerenje protoka se najčešće koristi za mjerenje nekoga svojstva fluida. Fluidi čiji se protok najčešće mjeri su tekućine, plinovi i mješavine tekućina i krutina. Najlakše je mjeriti tekućine jer su one nestlačive, dok mjerenje plinova zahtjeva dodatno računanje (korekciju) koristeći tlakove i temperature jer plinovi imaju svojstvo stlačivosti.

## 2.1 Podjela metoda mjerena protoka

1. Tlačno - diferencijalni protokomjeri
  - a. Mjerna prigušnica
  - b. Venturijeva cijev
  - c. Mjerna sapnica
2. Mehanički protokomjeri
  - a. Protokomjeri konstantnog volumena
  - b. Mjerne turbine
  - c. Ostali rotacijski protokomjeri
3. Elektronički protokomjeri
  - a. Magnetski protokomjeri
  - b. Vortex protokomjeri
  - c. Ultrazvučni protokomjeri
4. Maseni protokomjeri
  - a. Coriolis-ovi protokomjeri
  - b. Protokomjeri s vrućom žicom
  - c. Termodynamički protokomjeri

## 2.2 Određivanje protoka mjeranjem pada tlaka na suženju

Na slici 2. prikazano je protjecanje tekućine (kapljevine ili plina) kroz cijev u koje je ugradeno mjerno suženje. Zbog suženja dolazi do povećanja brzine tekućine i pada tlaka. Strujnice tekućine su putanje djelića tekućine koja protječe kroz cijev i njihovo maksimalno skupljanje je na mjestu iza najužeg geometrijskog otvora. Na slici su tri karakteristična mesta označena brojevima 1, 0 i 2. Mjesto 1 je ispred otvora suženja i dovoljno udaljenog od njega tako da ne dolazi do promjene brzine ili tlaka zbog prisustva ugrađenog suženja. Mjesto sa oznakom 0 je mjesto otvora suženja, a mjesto sa oznakom 2 je gdje se strujnice najviše skupljaju i mlaz tekućine ima minimalni presjek.



Slika 2. Prikaz strujnica, srednje brzine tekućine i tlaka kod protjecanja tekućine kroz mjerno suženje u cijevi.

### 2.2.1 Mjerna prigušnica

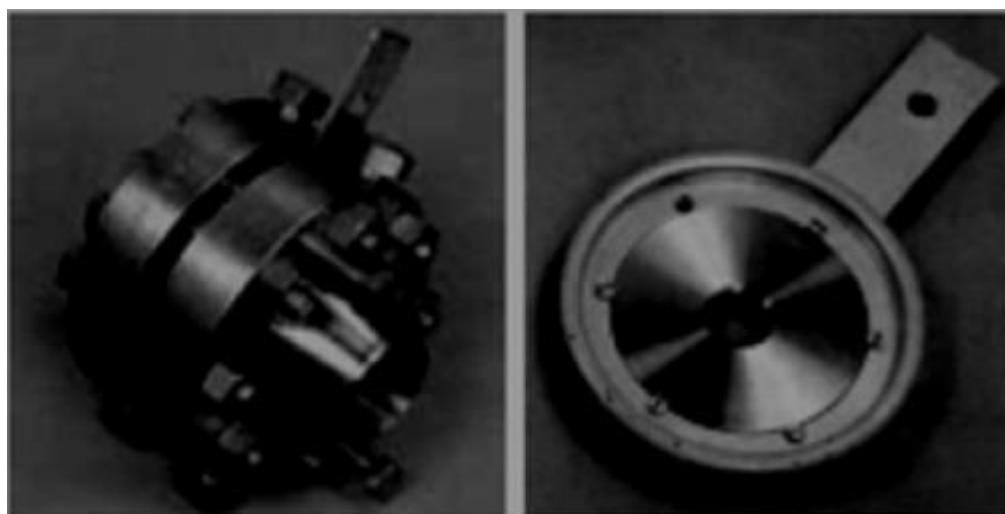
Mjerna prigušnica je tanka ploča sa otvorom, kružnog oblika i koncentrična s osi cjevovoda. Standarde mjerne prigušnice su tanke ploče sa oštrim rubom. Debljina ploče je mala u odnosu na poprečni presjek. Površine moraju biti paralelne i ravne. Ulagani rub otvora mora biti oštar, a smatra se takvom ako njen radius nije veći od  $0.0004d$ . Montaža je vrlo jednostavna uz pomoć prirubnica. Na taj način mjeru prigušnicu možemo zamijeniti nekim drugim mjerilom različitog iznosa omjera  $\beta$ .

Zbog pojave turbulencije ispred i iza otvora nastaju povećani gubici energije pa je za mjerila sa mernim prigušnicama karakterističan najveći diferencijalni tlak  $\Delta p$ , što rezultira visokom osjetljivošću. Iz tog razloga je iznimno važno mjesto na koji će se pričvrstiti mjeri uređaj tlaka. Razmak ulaznog mernog priključka je 25,4 mm i mjeri se od ulazne površine prigušnice, dok izlazni priključak mora biti na jednakom razmaku, ali mjereno od izlazne površine.

Mjerila protoka sa prigušnicama se koriste pri:

$$0,2 \leq \beta \leq 0,75$$

$$1260 \leq Re \leq 10^8$$



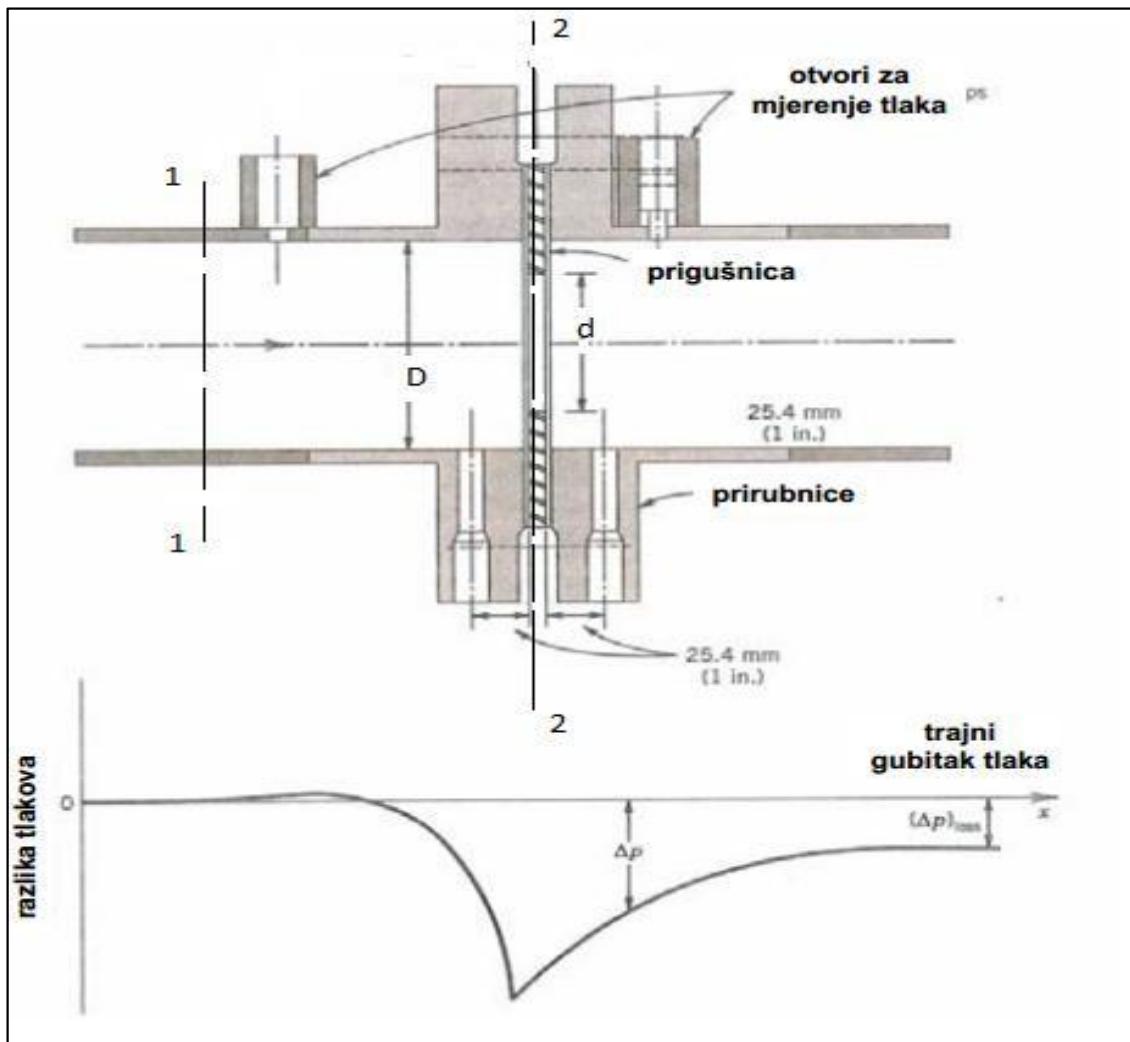
Slika 3. Mjerna prigušnica izrađena od pažljivo obrađenih i probušenih pločica koncentrično postavljenih između dvije prirubnice

Prednosti ovog načina mjerjenja su jednostavnost montaže, jednostavna primjena, relativno niska cijena i fleksibilnost. Upravo zato je ovo danas i najčešći način mjerjenja protoka fluida.

Međutim, glavni nedostatak je visoki nepovratni gubitak energije zbog turbulencija oko prigušnice što u slučaju većih protoka predstavlja ekonomske gubitke.

Označimo li sa  $A_1$  i  $A_2$  presjeke na odgovarajućim mjestima na cijevi zbog presjeka otvora mjernog suženja vrijedi sljedeća nejednakost:

$$A_1 > A_2$$



Slika 4. Presjek mjerne prigušnice te raspodjela tlaka unutar cijevi

Zbog suženja dolazi do promjene brzine tekućine duž cijevi i maksimalna brzina tekućine je na mjestu minimalnog presjeka mlaza. Povećanje brzine tekućine prouzrokuje smanjenje

tlaka, tako da je najveći tlak ispred suženja, a minimalan tlak je na mjestu maksimalne brzine.  
Za brzinu možemo također napisati nejednakosti:

$$v_1 < v_2$$

$$p_1 > p_2$$

Za protjecanje takozvane „idealne tekućine“ su promjene tlaka i brzine određene Bernoullijevom jednadžbom. Idealna tekućina je zamišljena tekućina zanemarivog viskoziteta, tako da se njenim protjecanjem ne troši energija. Sve realne tekućine imaju viskozitet veći od 0, tako da se Bernoullijeva jednadžba koristi samo kao aproksimacija za realne tekućine. Bernoullijeva jednadžba glasi:

$$p + \frac{\rho \cdot v^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h = \text{const.}$$

Svaki od tri člana predstavlja oblik energije po jedinici volumena tekućine. Prvi član je stacionarna energija tekućine, drugi član je kinetička energija, a treći je potencijalna energija. Ukupna energija se ne mijenja kod protjecanja tekućine tako da je zbroj sva tri oblika energije konstantan. Primjenimo li Bernoullijevu jednadžbu za 2 označena presjeka duž cijevi, možemo napisati:

$$p_1 + (\rho \cdot v_1^2)/2 = p_2 + (\rho \cdot v_2^2)/2 \quad (1)$$

Osim jednadžbe očuvanja energije potrebno je upotrijebiti i zakon očuvanja mase. Ako se radi o protjecanju kapljevine onda se zakon očuvanja mase može napisati u obliku očuvanja volumena:

$$v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 \quad (2)$$

Uvođenjem dva modula  $\beta = \frac{d}{D}$  i  $\beta^2 = \frac{A_1}{A_2}$  te uvrštavanjem (2) u (1) te uz brojne preinake dobivamo opći izraz za izračunavanje masenog protoka pomoću prigušnice:

$$q_m = C \cdot E \cdot \epsilon \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p}$$

### 2.2.1 Venturijeva cijev

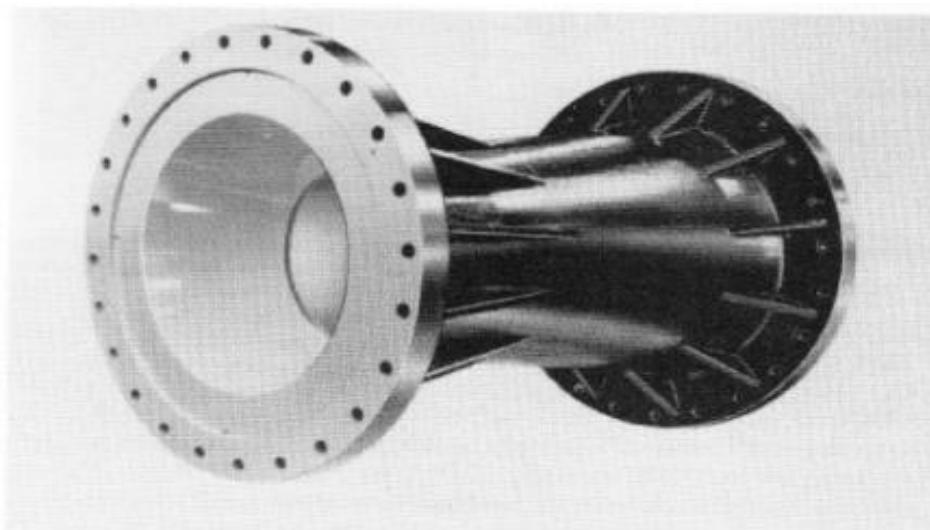
Venturijeva cijev se sastoji od ulaznog cilindra povezanog sa konvergentnim konusnim dijelom, cilindričnog grla i divergentnog konusnog dijela te dva piezometarska priključka. Unutrašnja površina uređaja je rotacijska površina i koncentrična je sa osi Venturijeve cijevi. Konvergentni dio i cilindrično grlo moraju biti koaksijalni što se provjerava vizualno. Jedan piezometarski priključak se nalazi prije suženja, a drugi na samom suženju i pomoću njih se mjeri razlika tlakova.

Venturijeva cijev za zadani omjer suženja cijevi  $\beta$  daje najmanji diferencijal tlaka  $\Delta p$  pa se primjenjuje kada se zahtjeva mali trajni gubitak tlaka. Također je pogodna za mjerjenje protoka fluida koji sadrže čvrste čestice.

Venturijeve cijevi se primjenjuju pri:

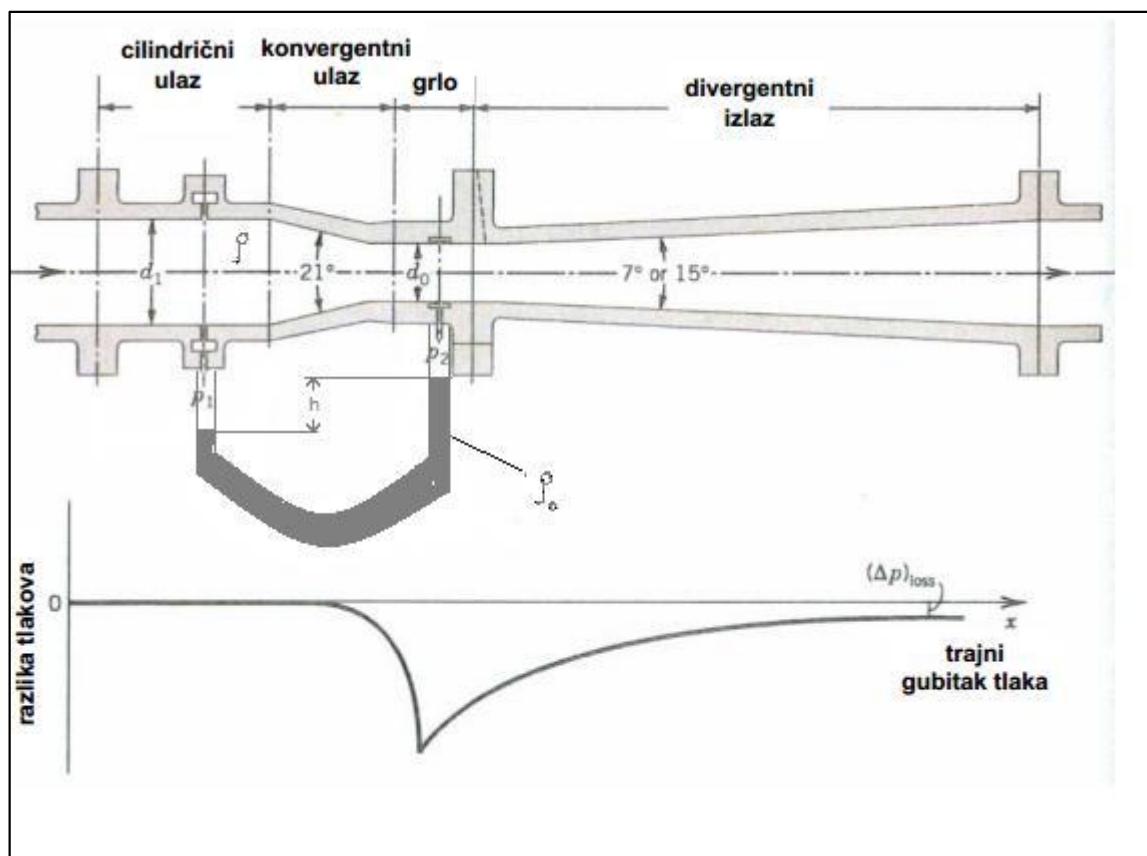
$$0,4 \leq \beta \leq 0,75$$

$$2 \cdot 10^5 \leq \text{Re} \leq 2 \cdot 10^6$$



Slika 5. Venturijeva cijev

Pošto mjerne prigušnice izazivaju veliki pad tlaka, u slučajevima kada to nije prihvatljivo koriste se Venturijeve cijevi. Kod ovih mjernih uređaja pad tlaka iznosi od 5 do 10 %, ali je i razlika tlakova smanjena. Posredno preko padova tlakova može se izračunati brzina strujanja fluida, iako je osnovna namjena određivanja protoka. Iako su Venturijeve cijevi bolje od prigušnica s teoretskog stajališta, ipak postoje praktični problemi kod ugradnje. Skuplje su za proizvesti i preglomazne ( npr. Venturijeva cijev bi trebala biti preko 2 m duga kada bi imala suženje dugo 25 cm i promjera 15 cm). Prednosti ovih cijevi su upravo najmanji gubitci strujanja i mogućnost mjerjenja protoka tekućina u kojima ima krutih tvari, ali pod uvjetom da je odnos količine krutih tvari prema količini tekućine konstantan. Slika 6. prikazuje Venturijevu cijev. Sastoji se od stožastog ulaznog dijela koji vodi do uskog grla, nakon kojega slijedi izlazni dio cijevi, a tlakovi se mijere prije suženja i u suženju.



Slika 6. Presjek Venturijeve cijevi i raspodjela tlaka

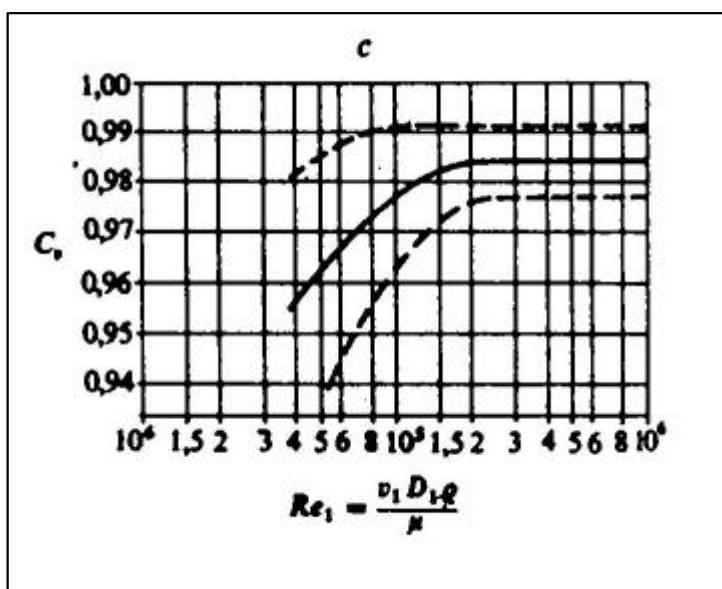
Iz jednadžbe kontinuiteta, Bernoulijeve jednadžbe i jednadžbe manometra slijedi izraz za protok idealnog fluida:

$$Q_{\text{id}} = \frac{d_0^2 \cdot \pi}{4} \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h \cdot (\frac{\rho_0}{\rho} - 1)}{1 - (\frac{d_0}{d_1})^4}}$$

Protok realnog fluida viskoznosti  $\mu$  je

$$Q = C_c \cdot C_v \cdot Q_{\text{id}}$$

Venturijeva cijev se izvodi tako da je faktor kontrakcije mlaza  $C_c = 1$ , a faktor korekcije brzine  $C_v$  je funkcija Reynoldsova broja  $Re_1 = \frac{\rho_1 v_1 d}{\mu}$ . Primjer zavisnosti faktora  $C_v$  o Reynoldsovom broju  $Re_1$  dan je na sljedećoj slici 7.



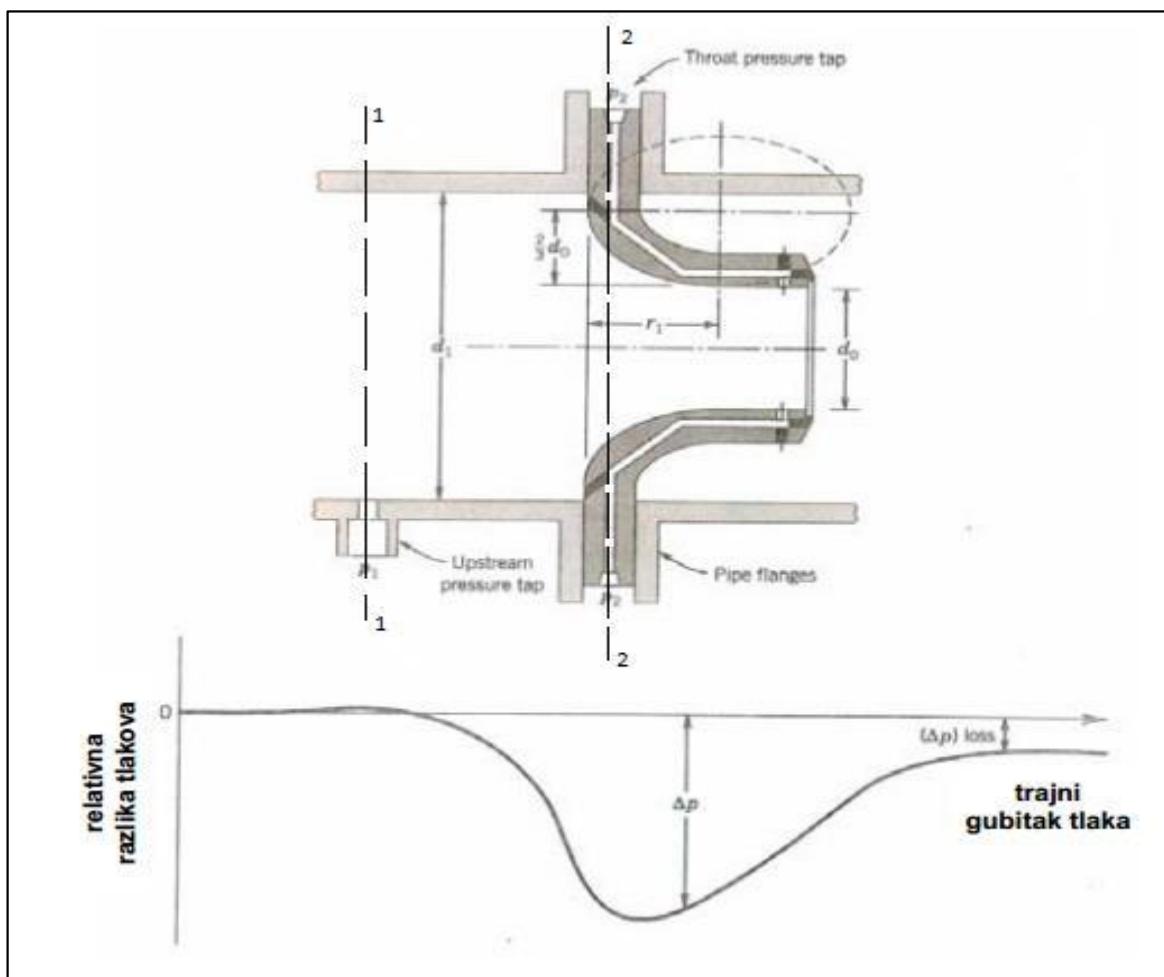
Slika 7. Zavisnost koeficijenata brzine  $C_v$  Venturijeve cijevi u ovisnosti o Reynoldsovom broju  $Re_1$

### 2.2.3 Mjerna sapnica

Mjerne sapnice se upotrebljavaju mnogo rijeđe od mjernih prigušnica. Njihova osnovna prednost što imaju manje gubitke uslijed trenja, što rezultira manjim nepovratnim padom tlaka. Osim toga veća je i protjecajna količina od one kakva se kod istog promjera i pod istim uvjetima postiže upotrebom mjerne prigušnice. Sapnica se može upotrijebiti i za mjerjenje protoka lagano muljevitih fluida.

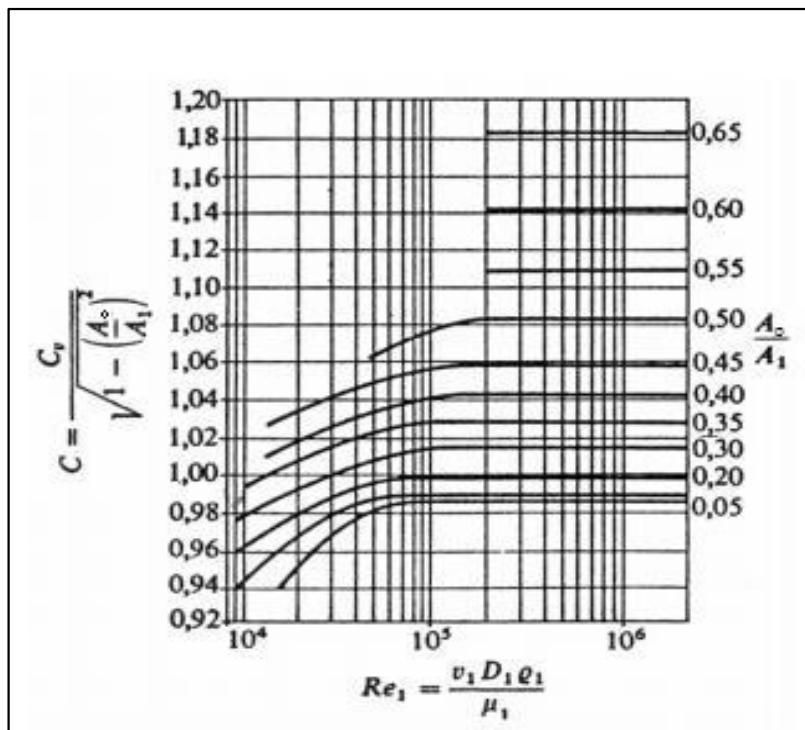
Mjerna sapnica prikazana je na slici 8. Primjenom jednadžbe kontinuiteta i Bernoullijeve jednadžbe, dobiva se izraz za protok

$$Q = C \cdot A_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p_1 - p_2)}$$



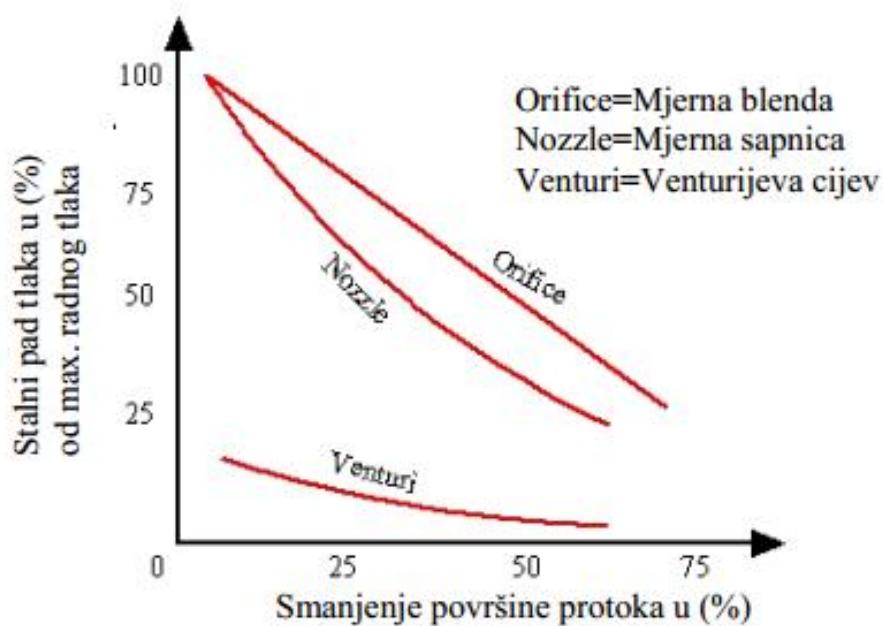
Slika 8. Mjerna sapnica

Kako bi se izbjeglo određivanje koeficijenta protoka  $C_d$  i koeficijenta brzine  $C_v$  prikazan je koeficijent  $C$  kao funkcija Reynoldsovog broja  $Re_1$  i omjera  $A_0/A_1$ . U našem slučaju  $A_1$  je površina unutrašnjeg presjeka cjevovoda, a  $A_0$  površina izlaznog presjeka sapnice. Podaci o koeficijentu  $C$  za različite odnose površina prikazani su u dijagramu na slici 9.



Slika 9. Dijagram koeficijenata protoka  $C$  mjerne sapnice u ovisnosti o Reynoldsovom broju  $Re_1$  ulaznog strujanja

## 2.2.4 Usporedba primjene mjerne prigušnice, Venturijeve cijevi i mjerne sapnica obzirom na stalni pad tlaka



**Dijagram 1.** Dijagram nepovratnog pada tlaka(%), za mjeru prigušnicu, mjeru sapnicu i Venturihevu cijev u ovisnosti o stupnju suženja površine protočnog presjeka u (%)

### 3. Opis provedenih mjerena

#### 3.1 Prikaz mjerne linije



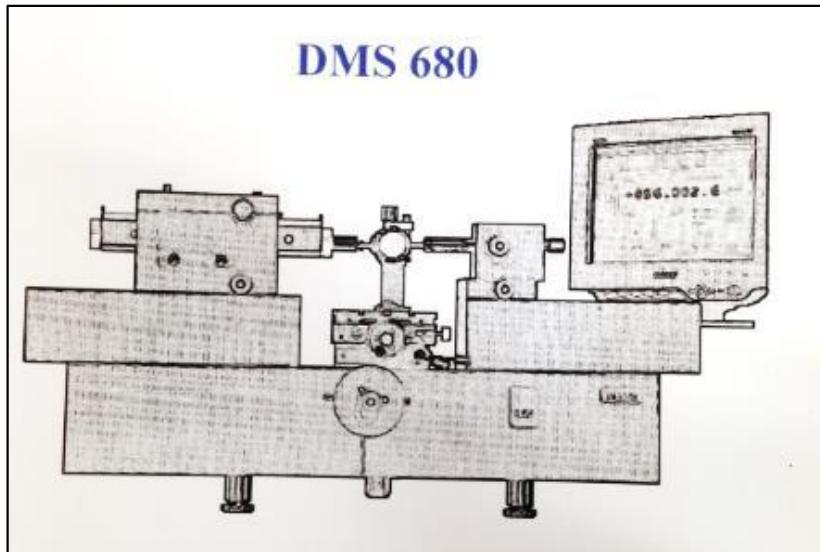
Slika 10. Prikaz mjerne linije

### 3.2 Opis mjerena

Prije samog početka mjerena u dogovoru s mentoricom i laborantom donijeta je odluka kojom smo najprije odlučili rastaviti mjernu liniju na kojoj se nalazi oštra prigušnica. Nakon provedenog remonta zatečeno je vrlo dobro stanje prigušnice koju smo zatim dobro isprali i očistili od nečistoća. Kako bi bili što sigurniji u naš rezultat nakon mjerena, prigušnica je odnijeta na mjerjenje unutarnjeg promjera u Nacionalni laboratorij za duljinu. Mjerjenje je provedeno pomoću preciznog jednoosnog mjernog uređaja u točno četiri mjerena te je izračunata srednja vrijednost unutarnjeg promjera kojeg ćemo koristiti u dalnjem proračunu. Nakon provedenog mjerena prigušnicu smo vratili u svoje prvotno stanje u mjernu liniju. Prilikom sastavljanja imali smo poteškoća s propuštanjem vode kod spoja pa smo s pomoću mase za brtvljenje riješili taj problem. Sljedeća zadaća prije samog mjerena je bila istiskivanje zraka iz cvjevodnog sustava pomoću ventila za odzračivanje zbog što preciznijeg mjerena. Zatim je uslijedilo puštanje u rad mjerne linije uključivanjem pumpe na trofaznu struju te provjera da li sve funkcioniра. Cilj našeg zadatka jest dobiti potrebnu razliku tlaka na prigušnici pomoću koje možemo dobiti maseni protok, odnosno brzinu. Mjerjenje ćemo izvršiti pomoću preciznog pretvornika tlaka koji će mjereni tlak pretvoriti u električni signal proporcionalan mjerrenom tlaku. Mjerjenje ćemo provesti u 5 točaka te na temelju toga iscrtati dijagram koji će se usporediti s dijagramom dobivenim pomoću mjerena tlaka na U-cijevi. Za dodatnu provjeru dobivenih rezultata ćemo mjerjenje protoka pomoću ultrazvučnog protokomjera skojim ćemo donijeti konačan zaključak.

### 3.2 Specifikacije uređaja korištenih tijekom mjerena

#### 1.Jednoosni mjerni uređaj



Slika 11. Univerzalni sustav za duljinu DMS 680

Tehničke specifikacije:

- Sustav za očitavanje: osobno računalo
- Mjerna jedinica: *mm/inches* ( mogućnost prebacivanja)
- Rezolucija:  $0.1\mu m \div 0.01\mu m^3$
- Apsolutni mjerni raspon: 100 mm
- Diferencijalni mjerni raspon(vanjski): 680 mm
- Mjerenje sile: 0÷2.5 N
- Radni stol: 160 x 160 mm

#### 2.Pretvornik tlaka LPM/LPX 9000



Slika 12. LMP/LPX 9000

Tehničke specifikacije:

- Proizvođač: Druck
- Strujni izlazni signal:  $4 - 20 \text{ mA}$
- Mjerno područje:  $0-10 \text{ mbar}$
- Izračunavanje tlaka na temelju strujnog signala preko linearne ovisnosti:

$$p = \frac{p_{\max} - p_{\min}}{20-4} \cdot (i - 4) + p_{\min} = \frac{\Delta p}{16} \cdot (i - 4) + p_{\min}$$

### 3. Mjerna prigušnica



Slika 13. Mjerna prigušnica

- Prigušnica s oštrim rubom
- Izmjerene vrijednosti promjera pomoću jednoosnog mjernog uređaja:

**Tablica 1. Vrijednosti promjera oštре prigušnice**

Mjerenje br.	Mjerni rezultat, mm
1.	31,1744
2.	31,1752
3.	31,1749
4.	31,175
D	31,1749

#### 4.Ultrazvučni protokomjer



Slika 14. Ultrazvučni protokomjer

- Metoda vremena prolaza
- Mjerenje pomoću dva ultrazvučna primopredajnika
- Zbog strujanja fluida javlja se razlika u vremenima uzvodnog i nizvodnog prolaza zvuka, na osnovu koje se može odrediti smjer i brzina strujanja

## 4. Pregled jednadžbi kod mjerena protočne količine pomoću oštred prigušnice prema ISO 5167-2:2003

Opći izraz za izračunavanje masenog protoka pomoću oštred prigušnice glasi:

$$q_m = C \cdot E \cdot \varepsilon \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p}$$

pri čemu su:

- $q_m$  - protočna količina ( $kg/s$ ),
- $C$  - koeficijent protjecanja (-),
- $E$  - faktor pristupne brzine (-),
- $\varepsilon$  - faktor ekspanzije (-),
- $\frac{d^2 \cdot \pi}{4}$  - površina presjeka svjetlog otvora prigušnice u pogonskom stanju ( $m^2$ ),
- $\rho$  - gustoća fluida čiji se protok mjeri uzstrujno od mjerne prigušnice ( $kg/m^3$ ),
- $\Delta p$  - razlika tlakova neposredno ispred i iza prigušnice  $\Delta p = p_1 - p_2$  ( $Pa$ ).

Na temelju provedenih eksperimenata za oštred prigušnice kod kojih su priključci za mjerjenje razlike tlakova izvedeni neposredno uz odgovarajuće plohe prigušnice ( Vidi Sliku 15.), definirane normom ISO 5167-2 dobivena je zavisnost za koeficijent protjecanja  $C$ :

$$C = 0,5961 + 0,0261 \cdot \beta^2 - 0,216 \cdot \beta^8 + 0,000521 \cdot \left( \frac{10^6 \cdot \beta}{Re_D} \right) + (0,0188 + 0,0063 \cdot A) \cdot \beta^{3,5} \cdot \left( \frac{10^6}{Re_D} \right)$$

$$A = \left( \frac{19000 \cdot \beta}{Re_D} \right)^{0,8}$$

pri čemu su:

- $\beta = \frac{d}{D}$  - bezdimenzionalni odnos svjetlih otvora prigušnice odnosno cjevovoda u koji je prigušnica ugrađena (-),
- $Re = \frac{w_1 \cdot D}{\mu}$  - Reynoldsova značajka strujanja u cjevovodu ispred prigušnice (-),
- $w_1$  - srednja brzina strujanja fluida u cjevovodu ispred prigušnice,
- $D$  - promjer cjevovoda u pogonskom stanju,

- $\mu$ - dinamički viskozitet ( $kg/sm$ ).

Oba promjera se uzimaju u pogonskom stanju pa za otvor prigušnice vrijedi:

$$d = d_0 \cdot [1 + \alpha_d \cdot (t - t_0)]$$

Promjer cjevovoda u pogonskom stanju računamo prema:

$$D = D_0 \cdot [1 + \alpha_D \cdot (t - t_0)]$$

Pri čemu su:

- $D_0$  i  $d_0$  su promjeri svjetlih otvora prigušnice i cjevovoda izmjereni pri temperaturi okoline  $t_0$  ( $mm$ ),
- $\alpha_d$  i  $\alpha_D$  su linearni koeficijenti temperaturnog istezanja za materijal prigušnice, odnosno cjevovoda ( $m/mK$ ),
- $t$  je temperatura u pogonskom stanju ( $^{\circ}C$ ).

Faktor pristupne brzine  $E$  je bezdimenzionalna značajka koja obuhvaća povećanje brzine nastalo uslijed suženja otvora prigušnice:

$$E = \frac{D^2}{\sqrt{D^4 - d^4}} = (1 - \beta^4)^{-1/2}$$

Faktor ekspanzije  $\epsilon$  je bezdimenzionalna značajka koja obuhvaća promjenu gustoće u slučaju protoka kompresibilnog fluida. Faktor ekspanzije uvodi se u jednadžbu protoka kada je fluid koji protječe kroz mjernu prigušnicu para ili plin. Pare i plinovi prilikom prolaska kroz prigušnicu zbog promjene tlaka mjenjaju gustoću tj. specifični volumen. Faktor ekspanzije  $\epsilon$  se to više razlikuje od 1 što je veća razlika tlaka prije i poslije prigušnice. Za strujanja plina malim brzinama kod kojih se pad tlaka na mjernoj prigušnici može zanemariti uzima se  $\epsilon=1$ . Osim o veličini pada tlaka koeficijent ekspanzije  $\epsilon$  ovisi i o eksponentu izentropske ekspanzije  $\kappa$ . Za nekompresibilne fluide  $\kappa=\infty$  te je  $\epsilon=1$ .

Empirijska jednadžba dobivena eksperimentalnim putem glasi:

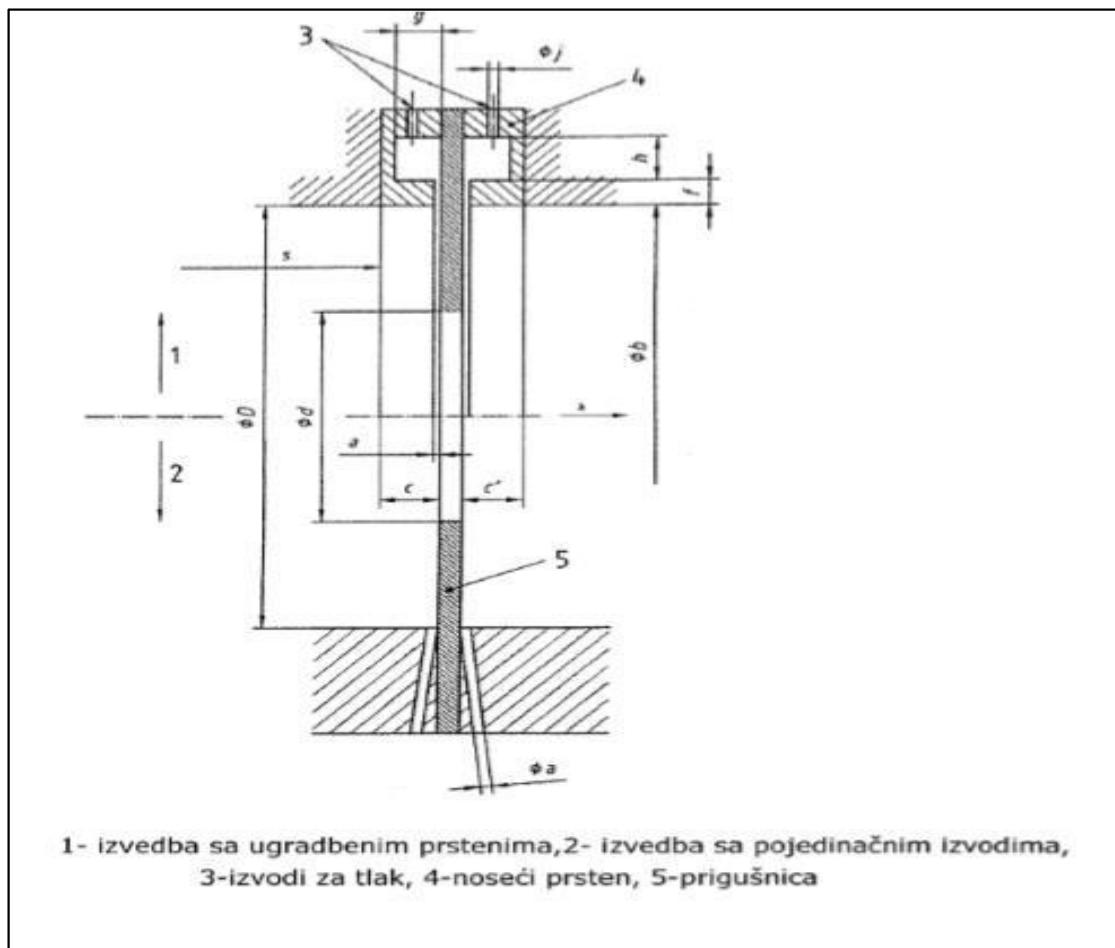
$$\epsilon = 1 - (0,351 + 0,256 \cdot \beta^4 + 0,93 \cdot \beta^8) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \right]$$

pri čemu su:

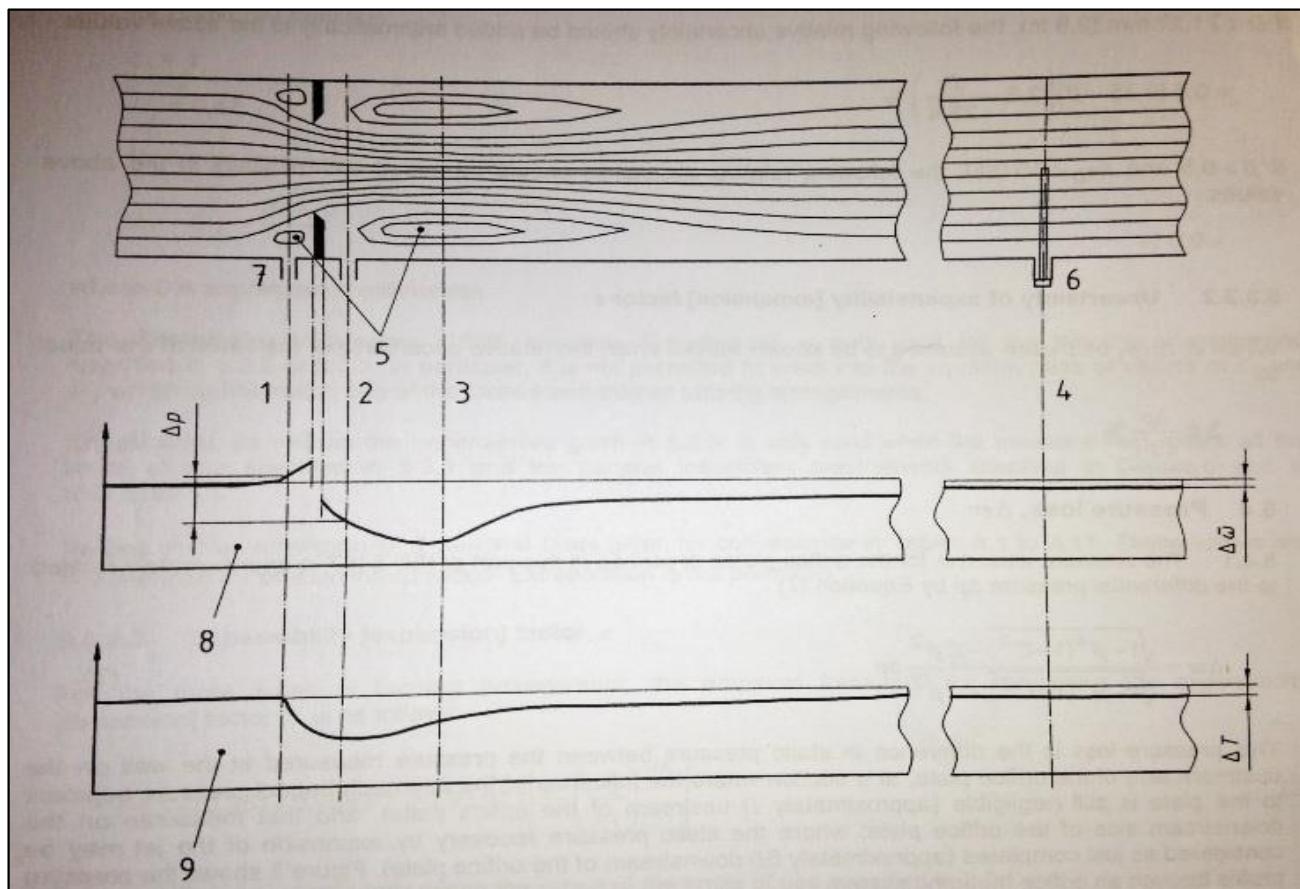
- $p_1$  i  $p_2$  statički tlakovi u cjevovodu ispred i iza prigušnice ( $Pa$ )
- $\kappa$  eksponent izentropske ekspanzije

Ograničenja uz koja vrijedi primjena navedenih jednadžbi za mjerjenje protoka pomoću oštре prigušnice glase:

- ograničenja u pogledu  $d$ ,  $D$  i  $\beta$ :  
$$d \geq 12,5 \text{ mm}$$
$$50 \leq D \leq 1000 \text{ mm}$$
$$0,23 \leq \beta \leq 0,80$$
- ograničenja u pogledu  $Re_D$  i  $\beta$  dana su u točki 5.3.1. norme
- ograničenja u pogledu hrapavosti dana su u točki 5.3.1. norme
- faktor ekspanzije  $\epsilon$  može se izračunati pomoću gore navedene jednadžbe samo ako je omjer  $p_2/p_1 \geq 0,75$
- normom je u potpunosti definirana geometrija prigušnice, hrapavost obrade kao i način provjere ispunjenosti ovih uvjeta. Zahtjevi i ograničenja u pogledu ugradnje mjerne prigušnice definirane su točkom 6 ove norme koja također obuhvaća i definira upotrebu i izgled uređaja za izravnavanje strujanja koji se primjenjuju u slučaju da za ugradnju prigušnice ne postoji dužina ravne cijevi ispred prigušnice dovoljna za postizanje uniformnog polja tlakova po presjeku cijevi ispred prigušnice.



Slika 15. Mjerna prigušnica za normu ISO 5167-2:2003



Slika 16. Približne skice protoka, tlaka i temperature u mjernom sustavu prigušnice prema ISO 5167-2:2003

1 - Ploča uzvodnih priključaka za mjerjenje tlaka

2 - Ploča nizvodnih priključaka za mjerjenje tlaka

3 - Ploča „vena contracta“ (najveće brzine)

4 - Ploča za temperaturnu sondu

5 - Sporedna područja protoka

6 - Utor za termometar

7 - Priključci za mjerjenje tlaka

8 - Raspodjela tlaka na stijenci

9 - Prosječna raspodjela temperature

## 5. Rezultati mjerena

### 5.1. Rezultati mjerena za gustoću vode pri 20 °C

Poznati podaci:

$$\rho_{20^\circ C} = 998.21 \text{ kg/m}^3$$

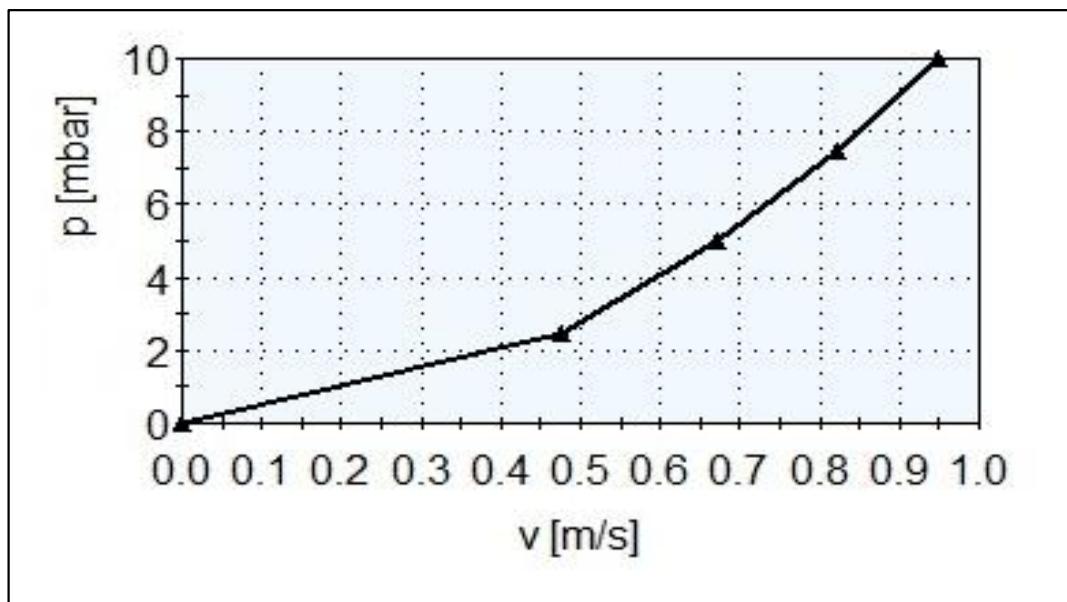
$$\mu_{20^\circ C} = 1.003 \cdot 10^{-3} \text{ Pas}$$

$$D = 50 \text{ mm}$$

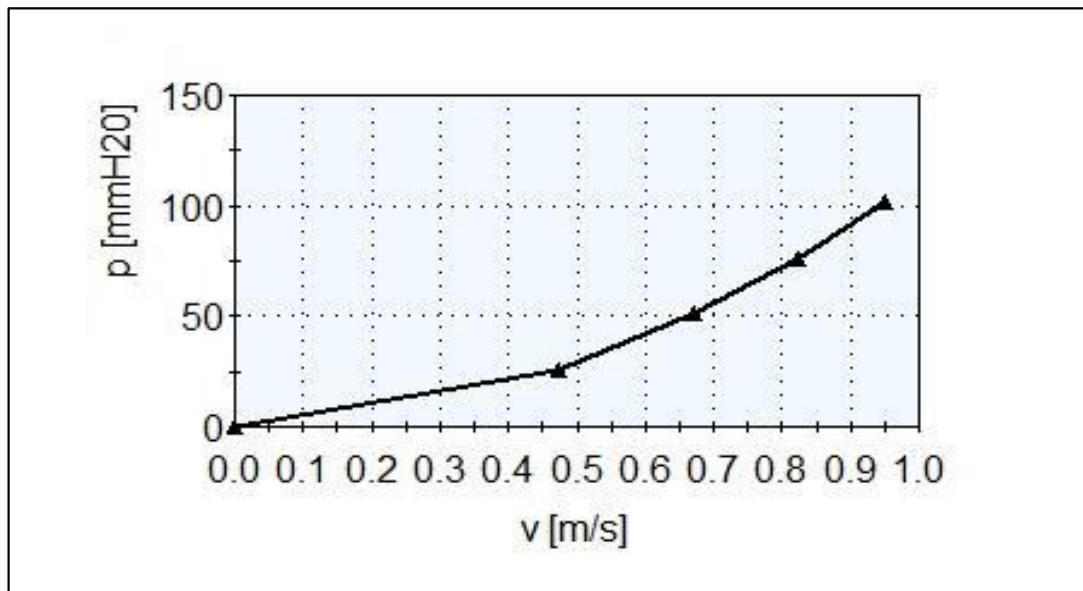
$$d = 31.17 \text{ mm}$$

**Tablica 2. Rezultati mjerena pri temperaturi vode od 20°C**

Redni broj mjerena	I [mA]	Δp [mbar]	Δp [Pa]	Δp [mmH2O]	qm [kg/s]	qv [m³/s]	qv [lit/min]	v [m/s]
1.	4	0	0	0	0	0	0	0
2.	8	2,50	250,0	25,49	0,362	$3,626 \cdot 10^{-4}$	21,76	0,475
3.	12	5,00	500,0	50,99	0,512	$5,129 \cdot 10^{-4}$	30,77	0,672
4.	16	7,50	750,0	76,48	0,627	$6,281 \cdot 10^{-4}$	37,69	0,823
5.	20	10,00	1000,0	101,97	0,723	$7,243 \cdot 10^{-4}$	43,46	0,949



Dijagram 2. Karakteristika prigušnice prikazana ovisnošću brzine i tlaka[mbar] pri 20°C



Dijagram 3. Karakteristika prigušnice prikazana ovisnošću brzine i tlaka[mmH2O] pri 20°C

## 5.2. Rezultati mjerjenja za gustoću vode pri 25 °C

Poznati podaci:

$$\rho_{25^\circ C} = 996.93 \text{ kg/m}^3$$

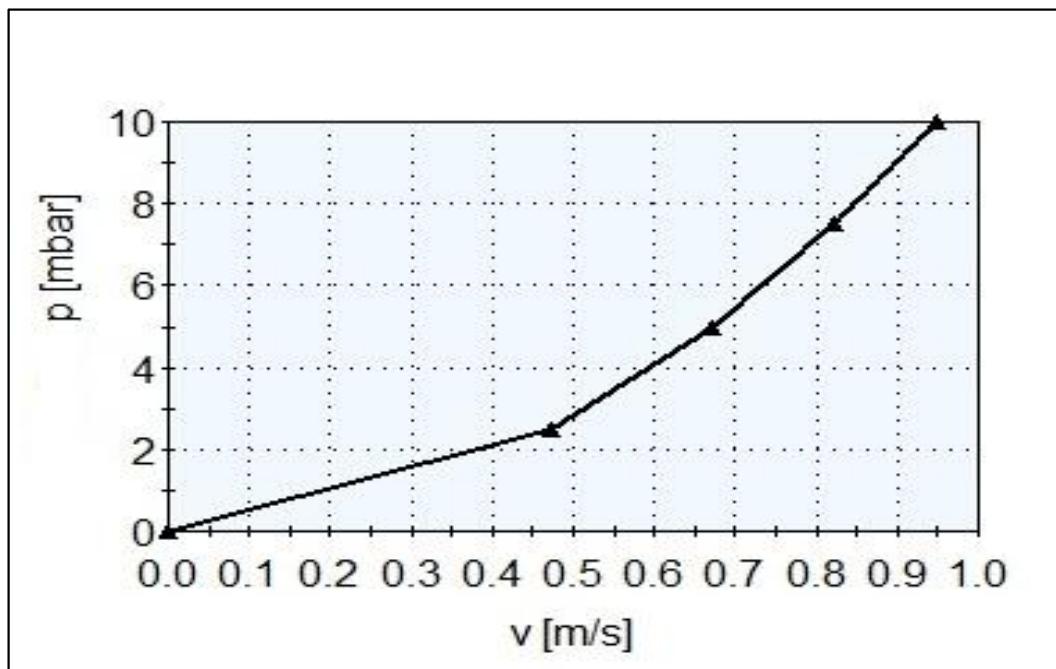
$$\mu_{25^\circ C} = 8.9 \cdot 10^{-4} \text{ Pas}$$

$$D = 50 \text{ mm}$$

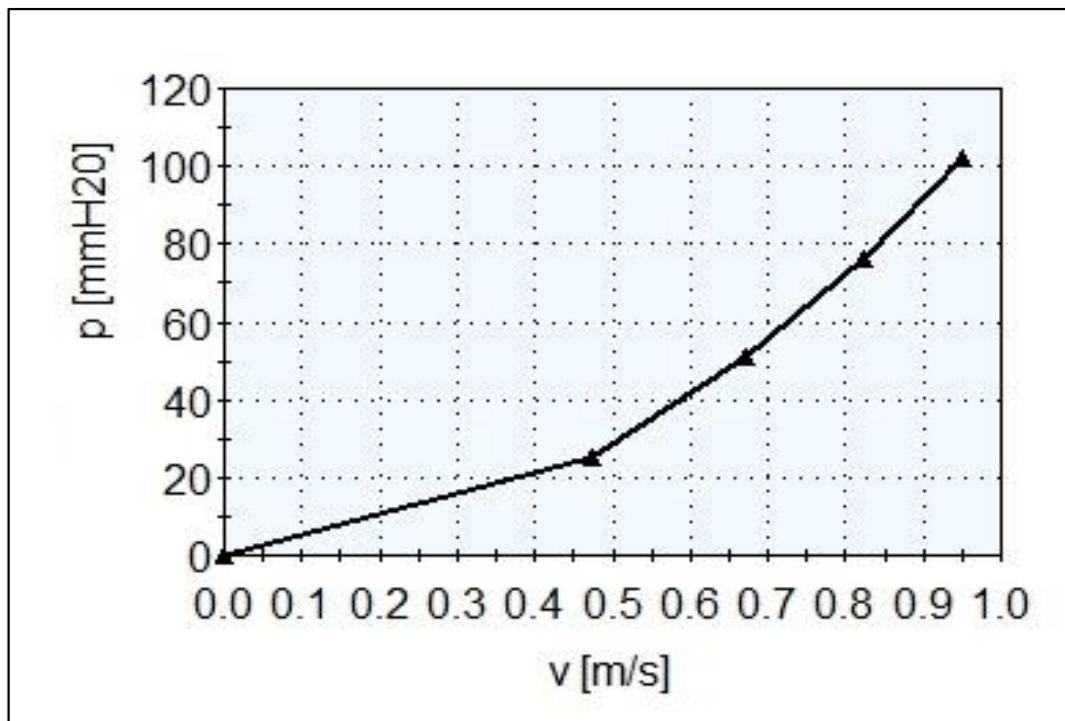
$$d = 31.17 \text{ mm}$$

Tablica3. Rezultati mjerjenja pri temperaturi vode od 25°C

Redni broj mjerjenja	I [mA]	$\Delta p$ [mbar]	$\Delta p$ [Pa]	$\Delta p$ [mmH2O]	qm [kg/s]	qv [m³/s]	qv [lit/min]	v [m/s]
1.	4	0	0	0	0	0	0	0
2.	8	2,50	250,0	25,49	0,361	$3,621 \cdot 10^{-4}$	21,73	0,474
3.	12	5,00	500,0	50,99	0,510	$5,116 \cdot 10^{-4}$	30,70	0,670
4.	16	7,50	750,0	76,48	0,625	$6,27 \cdot 10^{-4}$	37,62	0,822
5.	20	10,00	1000,0	101,97	0,722	$7,242 \cdot 10^{-4}$	43,45	0,949

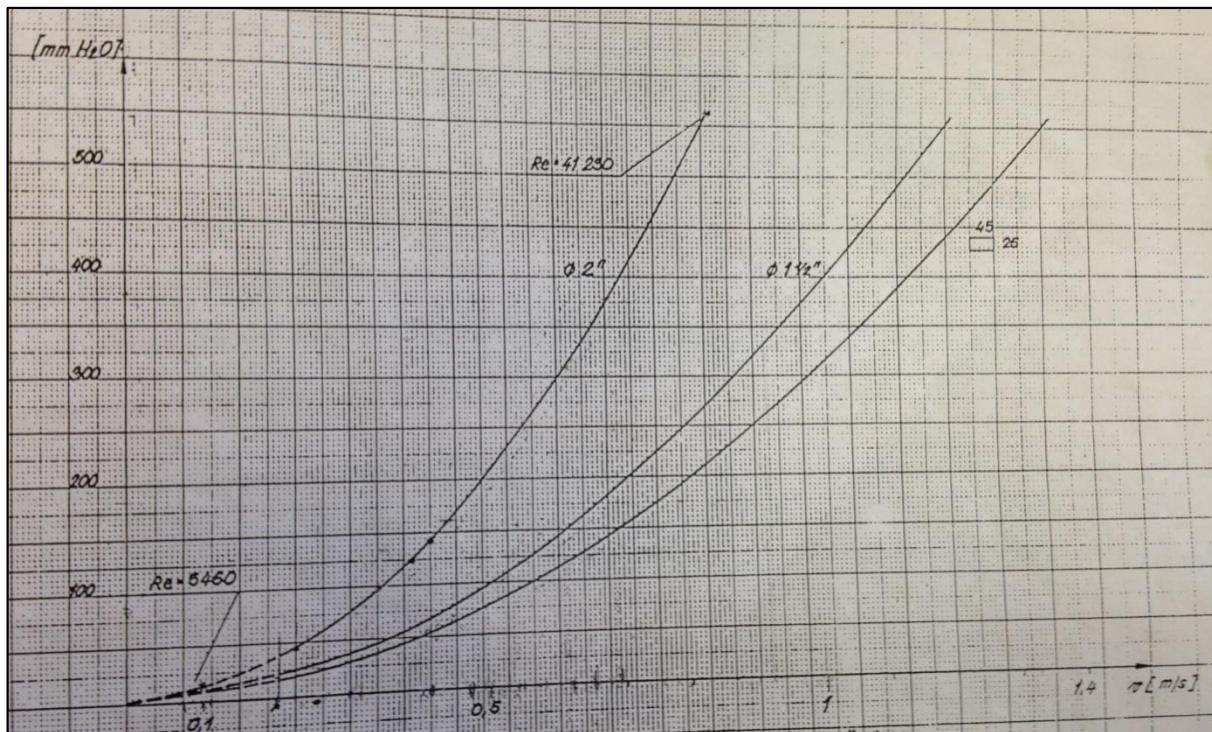


Dijagram 4. Karakteristika prigušnice prikazana ovisnošću brzine i tlaka[mbar] pri 25°C



Dijagram 5. Karakteristika prigušnice prikazana ovisnošću brzine i tlaka[mmH<sub>2</sub>O] pri 25°C

### 5.3. Usporedba dobivenih rezultata i rezultata dobivenih na temelju mjerjenja razlike tlaka pomoću U-cijevi



Dijagram 6. Karakteristika prigušnice dobivena mjerjenjem razlike tlaka pomoću U-cijevi

Dobivene dijagrame 2. i 4. uspoređujemo s dijagramom 5. u mjernom području od 0-100 mm  $H_2O$  jer smo prilikom našeg mjerjenja koristili pretvornik tlaka s rasponom od 0-10 mbar, odnosno 0-100 mm  $H_2O$ . Kao što vidimo u dobivenim dijagramima 1. do 4. mogu se točno očitati brzine strujanja za male otklone tlakova, dok u dijagramu 5. iščitavanje je grubo te moguće su veće pogreške.

Za dodatnu usporedbu Dijagrama 3. te Dijagrama 6. uzimamo iz drugog 4 različite brzine te pomoću krivulje koja vrijedi za promjer  $\varnothing 1^{1/2}$ " očitavamo padove tlakova i izračunavamo maseni protok. Isti postupak za iste brzine napravimo pomoću Dijagrama 3.

**Tablica 4. Izračunavanje masenog protoka iz Dijagrama 6.**

$v [m/s]$	$\Delta p [mmH2O]$	$\Delta p [Pa]$	$qm [kg/s]$
0,3	35	343	0,424
0,4	60	588	0,555
0,5	95	932	0,698
0,6	125	1176	0,784

**Tablica 5. Izračunavanje masenog protoka iz Dijagrama 3.**

$v [m/s]$	$\Delta p [mmH2O]$	$\Delta p [Pa]$	$qm [kg/s]$
0,3	20	196	0,32
0,4	25	245	0,358
0,5	30	294	0,392
0,6	45	441	0,48

Iz dobivenih rezultata masenog protoka zaključujemo da su naše pretpostavke o grubom iščitavanju iz Dijagrama 6. u potpunosti opravdane. Dobiveni su maseni protoci za 4 različite brzine te vidimo velika odstupanja u konačnim rezultatima za iste brzine, a to je posljedica nesigurnog iščitavanja iz Dijagrama 6.

## 5.4. Mjerenje protoka ultrazvučnim protokomjerom te usporedba s dobivenim rezultatima na oštroj prigušnici

1.korak – za odabranih 4 točaka različite jakosti struje na pretvorniku tlaka mjere se protoci pomoću metode vremena prolaza.

**Tablica 6. Rezultati mjerjenja ultrazvučnim protokomjerom**

	I [mA]	qv[lit/min]
1.	8	28,5 – 30
2.	12	32,5 – 34
3.	16	38,2 – 39,2
4.	20	46,5 – 48,5

2. korak – iz očitanih rezultata protoka u koraku 1. umjeravamo protoke za svaku točku te očitavamo vrijednosti jakosti struje.

**Tablica 7. Umjeravanje pomoću 1. koraka**

	qv[lit/min]	I [mA]
1.	28-30	8,5
2.	32-34	11
3.	38-39,5	15
4.	47-48	19,3

3. korak – ponavljamo postupak iz 2. koraka samo uz rezultate protoka dobivenih u prethodnom koraku

**Tablica 8. Umjeravanje pomoću 2. koraka**

	qv[lit/min]	I [mA]
1.	28,6-29,4	8,3
2.	32-34	10,8
3.	38,8-39,5	15
4.	48,5-49,1	19,7

**Tablica 7. Usporedba protoka izmjerenih na ultrazvučnom protokomjeru i oštroj prigušnici**

Ultrazvučni protokomjer		Oštra prigušnica
qv[lit/min]	I[mA]	qv[lit/min]
28,6-29,4	8	21,76
32-34	12	30,77
38,8-39,5	16	37,69
48,5-49,1	20	43,46

Usporedbom rezultata vidimo kako je mjerjenje protoka ultrazvučnim protokomjerom vrlo nesigurno i netočno za neka ozbiljnija mjerena. Zbog ovakvih slučajeva za preciznija i sigurnija mjerena usmjeravamo se na oštru prigušnicu korištenu u glavnom dijelu našeg zadatka.

## 6. Zaključak

Ovim završnim radom prikazan je princip rada i mjerjenje protoka oštom prigušnicom pri strujanju vode kao medija kroz mjernu liniju. U radu je prikazan pregled metoda mjerjenja protoka, teorijske osnove svake metode te princip rada.

Nakon teorijskog uvoda, upoznavanja sa metodama i načinima mjerjenja krenulo se mjerenu koristeći mjernu opremu u Laboratoriju za procesna mjerjenja. Nakon opisa postupka navedeni su svi uređaji koji su korišteni tijekom mjerjenja te definirani uvjeti u kojima su mjerena izvršena. S dobivenim rezultatima protoka na oštroj prigušnici možemo zaključiti kako je ova metoda mjerjenja dovoljno sigurna i precizna za male padove tlakova, dok za veće padove potrebno je imati bolje pretvornike koji ujedno povećavaju troškove mjerjenja. U radu je prikazan i utjecaj promjene gustoće vode zbog povećanja temperature za  $5^{\circ}\text{C}$ , ali vidimo kako se rezultati vrlo malo razlikuju. Uvođenjem ultrazvučnog protokomjera htjeli smo dobiti dodatnu provjeru protoka kako bi bili što sigurniji u naše mjerjenje oštom prigušnicom.

Za kraj mogu reći da sam vrlo zadovoljan postignutim rezultatima i da sam radeći ovaj rad upoznao neke nove metode mjerjenja. Nadam se da će ovaj rad poslužiti budućim generacijama studenata, što je i bila poanta ovoga rada.

## 7. Literatura

- [1] D. Zvizdić, L. Grgec Bermanec: *Predavanja iz kolegija mjerjenja u energetici*, FSB-LPM, 2009./2010.
- [2] Virag Z., *Mehanika fluida: Odabрана poglavlja, primjeri i zadaci*, FSB, Zagreb, 2002.
- [3] International standard, ISO 5167-2 (E/F), *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full, Part 2: Orifice plates*
- [4] Kraut, *Strojarski priručnik*, Sajema, Zagreb, 2009.
- [5] [http://www.fsb.unizg.hr/zbrodo/pokus/upload/others/MFI\\_12.pdf](http://www.fsb.unizg.hr/zbrodo/pokus/upload/others/MFI_12.pdf)
- [6]  
[http://www.riteh.uniri.hr/zav\\_katd\\_sluz/zvd\\_teh\\_term\\_energ/nas/laboratorijske\\_vjezbe\\_%2007/5\\_brzina\\_strujanja.pdf](http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zvd_teh_term_energ/nas/laboratorijske_vjezbe_%2007/5_brzina_strujanja.pdf)
- [7] [https://www.fer.unizg.hr/\\_download/repository/Mjerenje-Protoka.pdf](https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/Mjerenje-Protoka.pdf)
- [8] [http://www.werma.org/steam/steam\\_venturi.html](http://www.werma.org/steam/steam_venturi.html)