

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:635942>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**

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 smjericama 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, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje
Datum 25-02-2015 Prilog
Klasa: 602-04/15-613
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 mjerenja i/ili ispitivanja mjerila protoka potrebno je razraditi određivanje protočne količine oštrom prigušnicom. U radu koristiti postojeću mjernu opremu u Laboratoriju za procesna mjerenja, te razmotriti mogućnosti poboljšanja zadanog mjernog sustava.

Potrebno je izraditi:

- Pregled metoda mjerenja protoka
- Prikaz mjerne linije za mjerenje protoka oštrom prigušnicom
- Opis postupka mjerenja
- 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 mjerenja protoka	11
2.1 Podjela metoda mjerenja protoka	13
2.2 Određivanje protoka mjerenjem 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 mjerenja	24
3.1 Prikaz mjerne linije	24
3.2 Opis mjerenja.....	25
3.2 Specifikacije uređaja korištenih tijekom mjerenja	26
4. Pregled jednadžbi kod mjerenja protočne količine pomoću oštrog prigušnice prema ISO 5167-2:2003.....	29
5. Rezultati mjerenja.....	34
5.1. Rezultati mjerenja za gustoću vode pri 20 °C.....	34
5.2. Rezultati mjerenja za gustoću vode pri 25 °C.....	35
5.3. Usporedba dobivenih rezultata i rezultata dobivenih na temelju mjerenja razlike tlaka pomoću U-cijevi	37
5.4. Mjerenje protoka ultrazvučnim protokomjerom te usporedba s dobivenim rezultatima na oštrog 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 postavjenih 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 koeficijenta brzine C_v Venturijeve cijevi u ovisnosti o Reynoldsovom broju Re_1	20
Slika 8. Mjerna sapnica	21
Slika 9. Dijagram koeficijenta 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 oštre prigušnice	27
Tablica 2. Rezultati mjerenja pri temperaturi vode od 20°C.....	34
Tablica 3. Rezultati mjerenja 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 mjerenja 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[mmH2O] 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[mmH2O] pri 25°C.....	36
Dijagram 6. Karakteristika prigušnice dobivena mjerenjem 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
ρ	kg/m^3	gustoća
μ	$Pa s$	dinamički viskozitet
d	mm	unutarnji promjer
D	mm	vanjski promjer
p	Pa	tlak
h	m	visina
β	-	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
κ	-	izentropski koeficijent
ε	-	faktor ekspanzije
I	A	jakost struje

SAŽETAK

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

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

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 kapljevine, 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 mjerenja.

Potreba za mjerenjem 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 daljnjem 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 mjerenje 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 mjerenja protoka

Na početku ćemo definirati osnovne veličine protoka:

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

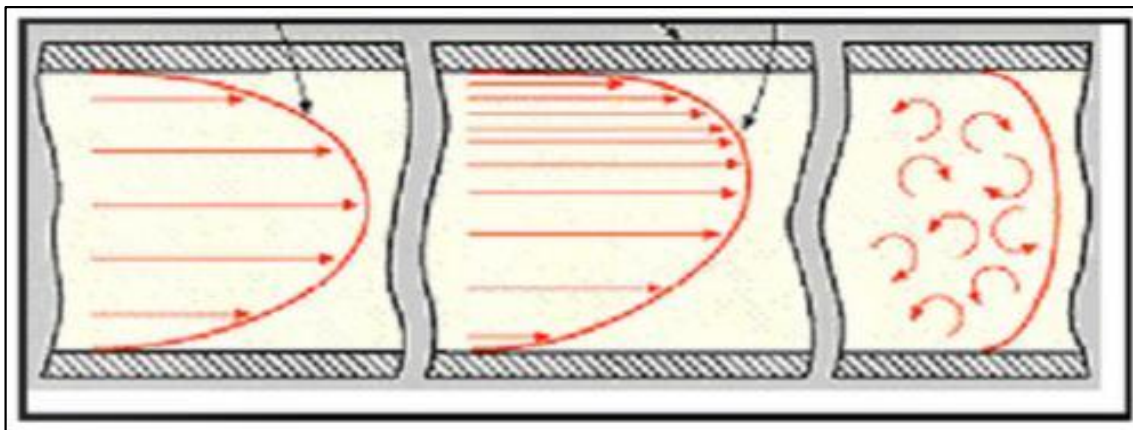
Volumni protok u cijevi definiran je limesom omjera volumena tekućine koja protječe kroz presjek cijevi u intervalu vremena kada interval postaje beskonačno mali:

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

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:

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

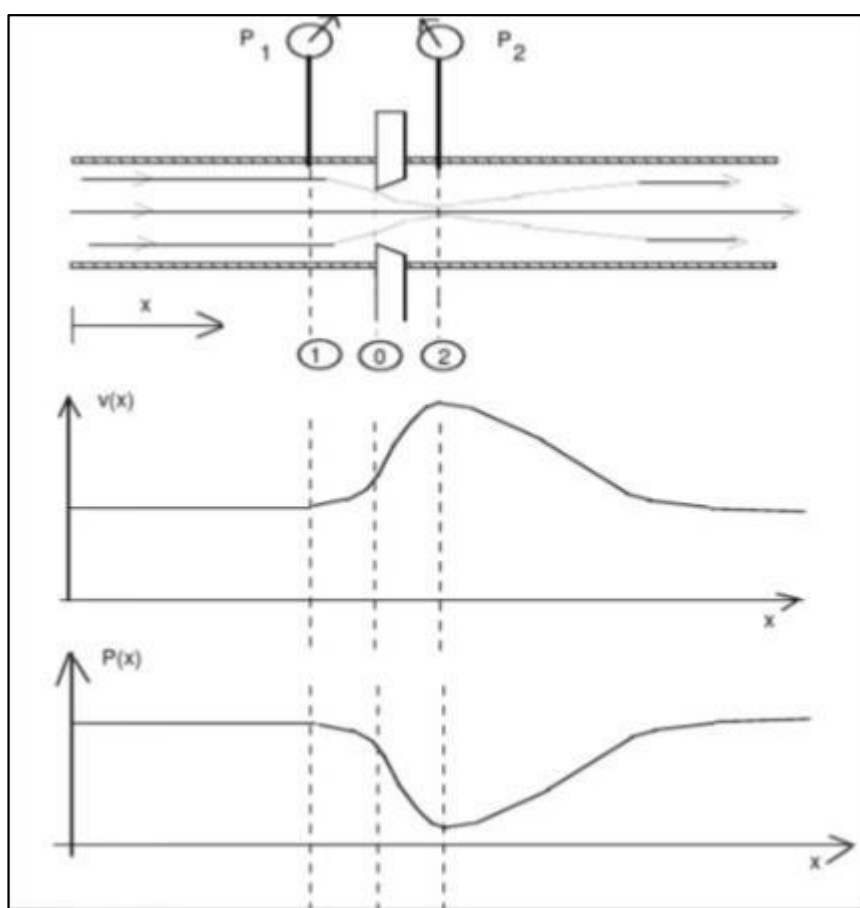
Mjerenje protoka se najčešće koristi za mjerenje nekoga svojstva fluida. Fluidi čiji se protok najčešće mjeri su tekućine, plinovi i mješavine tekućina i krutina. Najlakše je mjeriti tekućine jer su one nestlačive, dok mjerenje plinova zahtjeva dodatno računanje (korekciju) koristeći tlakove i temperature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

2.1 Podjela metoda mjerenja 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. Termodinamički protokomjeri

2.2 Određivanje protoka mjerenjem pada tlaka na suženju

Na slici 2. prikazano je protjecanje tekućine (kapljevine ili plina) kroz cijev u koje je ugrađeno 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 mjesta 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

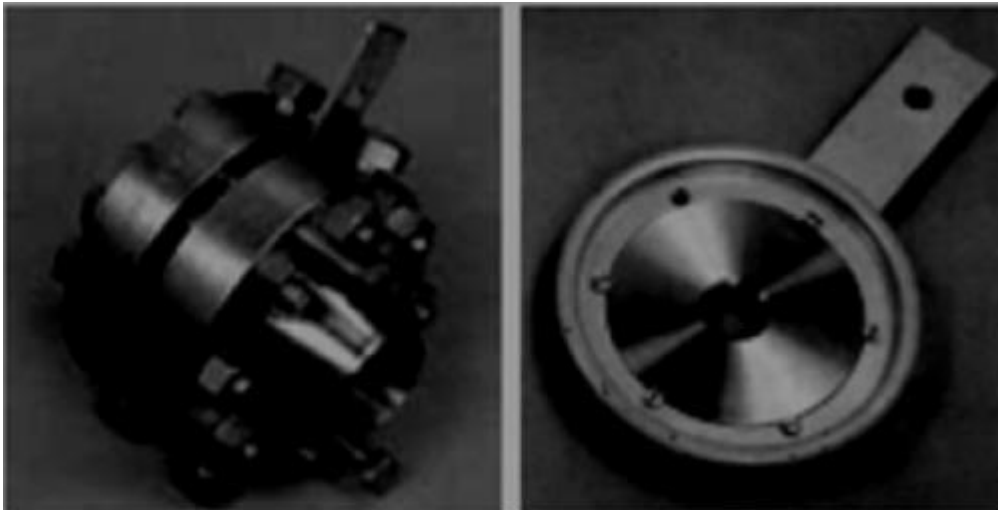
Mjerna prigušnica je tanka ploča sa otvorom, kružnog oblika i koncentrična s osi cjevovoda. Standardne mjerne prigušnice su tanke ploče sa oštrim rubom. Debljina ploče je mala u odnosu na poprečni presjek. Površine moraju biti paralelne i ravne. Ulazni rub otvora mora biti oštar, a smatra se takvom ako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

Zbog pojave turbulencije ispred i iza otvora nastaju povećani gubici energije pa je za mjerila sa mjernim prigušnicama karakterističan najveći diferencijalni tlak Δp , što rezultira visokom osjetljivošću. Iz tog razloga je iznimno važno mjesto na koji će se pričvrstiti mjerni uređaj tlaka. Razmak ulaznog mjernog 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:

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

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



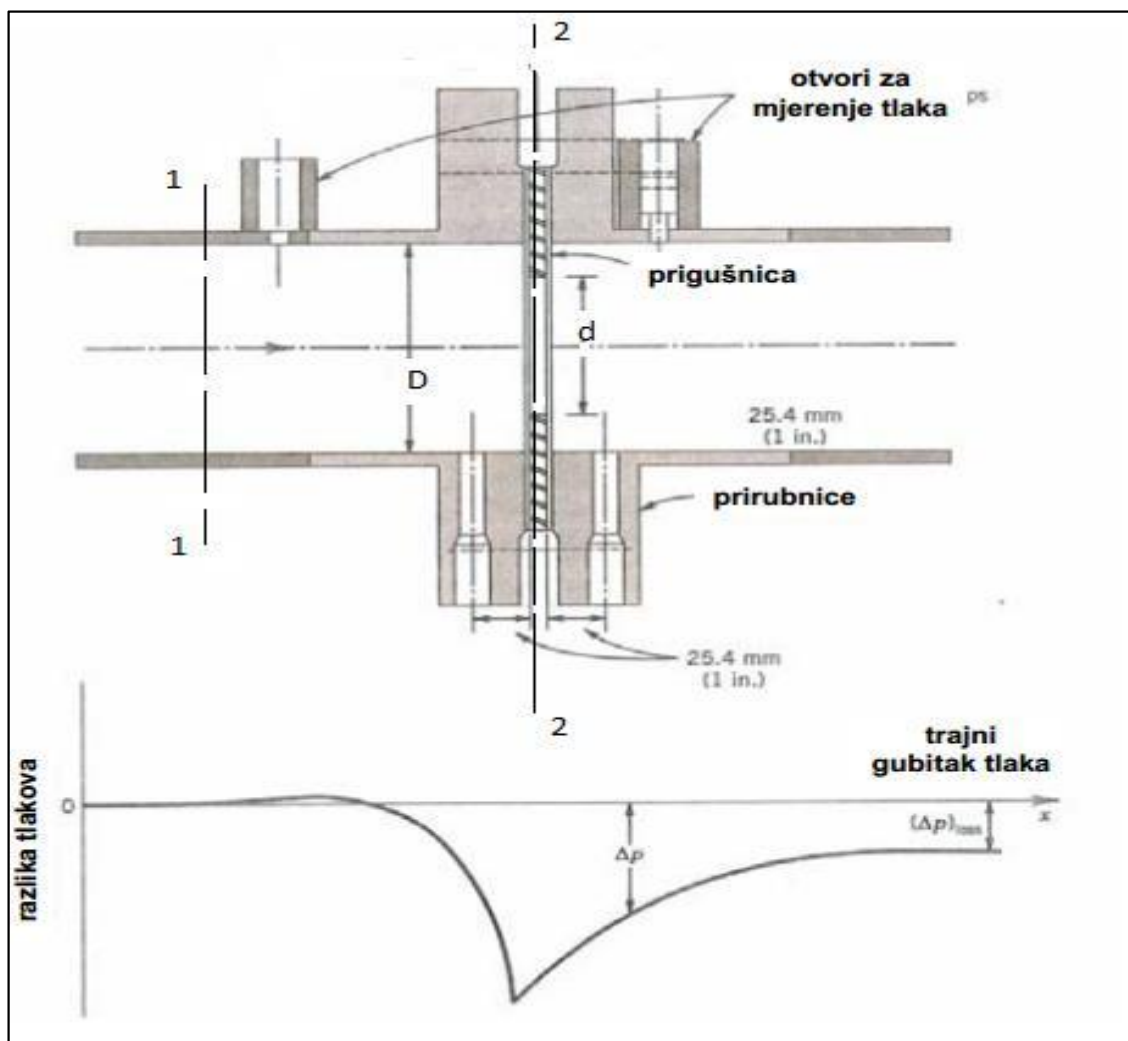
Slika 3. Mjerna prigušnica izrađena od pažljivo obrađenih i probušenih pločica koncentrično postavjenih između dvije prirubnice

Prednosti ovog načina mjerenja su jednostavnost montaže, jednostavna primjena, relativno niska cijena i fleksibilnost. Upravo zato je ovo danas i najčešći način mjerenja 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 očuvanje 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:

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

2.2.1 Venturijeva cijev

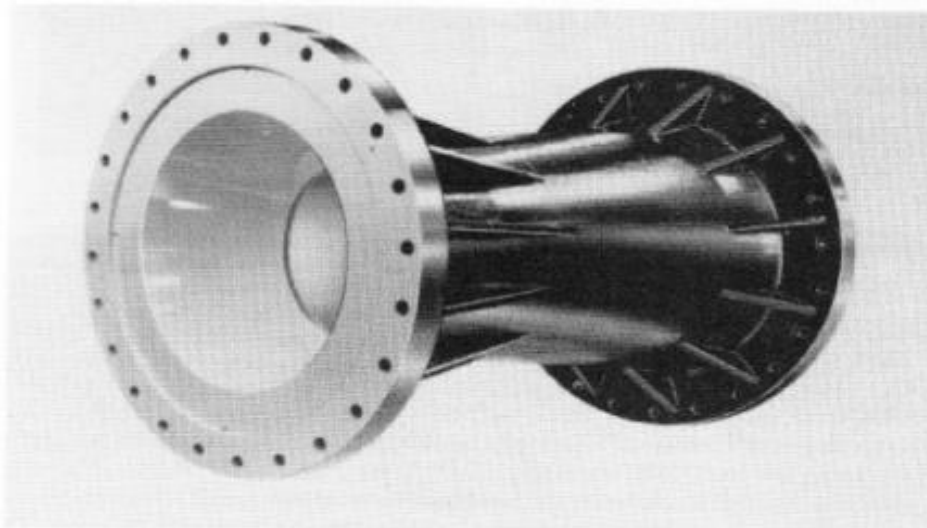
Venturijeva cijev se sastoji od ulaznog cilindra povezanog sa konvergentnim konusnim dijelom, cilindričnog grla i divergentnog konusnog dijela te dva piezometarska priključka. Unutrašnja površina uređaja je rotacijska površina i koncentrična je sa osi Venturijeve cijevi. Konvergentni dio i cilindrično 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 β daje najmanji diferencijal tlaka Δp pa se primjenjuje kada se zahtjeva mali trajni gubitak tlaka. Također je pogodna za mjerenje protoka fluida koji sadrže čvrste čestice.

Venturijeve cijevi se primjenjuju pri:

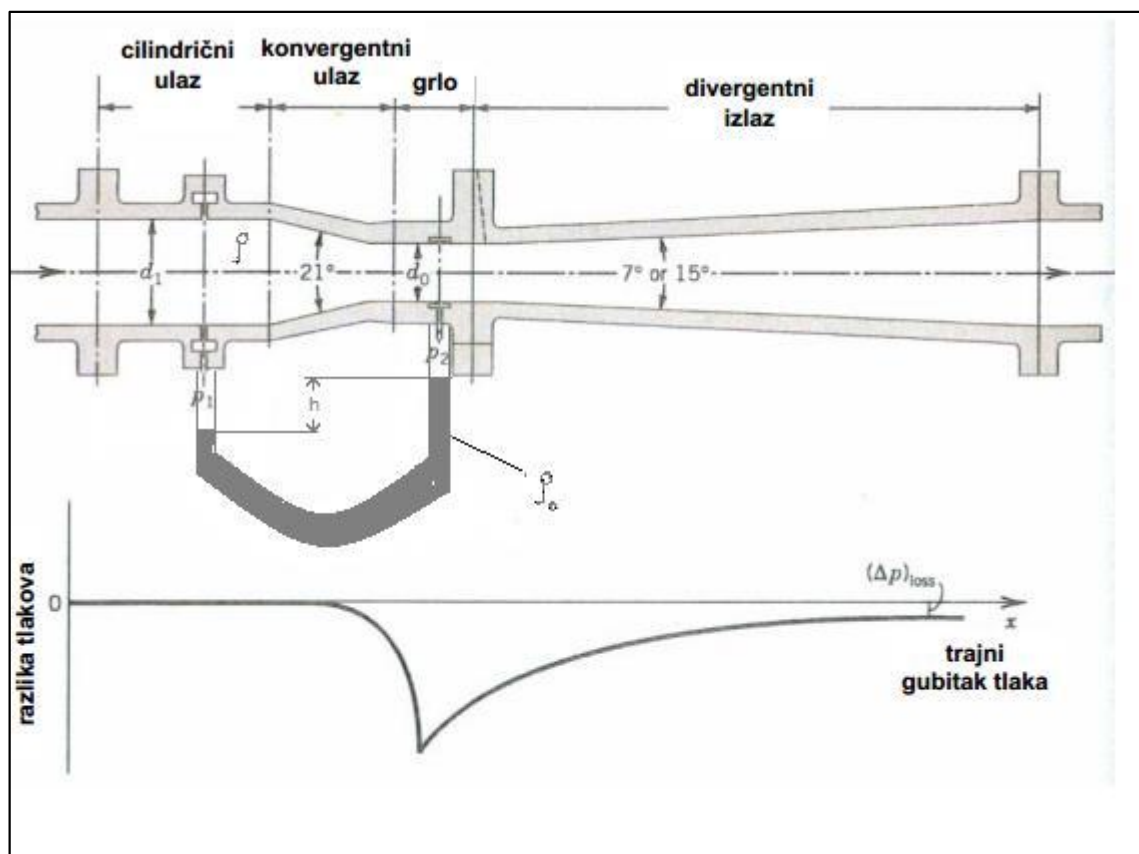
$$0,4 \leq \beta \leq 0,75$$

$$2 \cdot 10^5 \leq Re \leq 2 \cdot 10^6$$



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 mjerenja 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 mjere prije suženja i u suženju.



Slika 6. Presjek Venturijeve cijevi i raspodjela tlaka

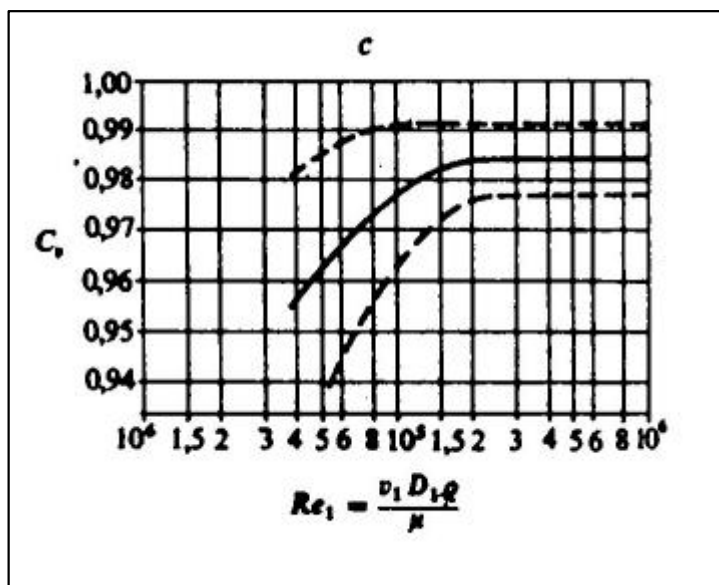
Iz jednađbe kontinuiteta, Bernoulijeve jednađbe i jednađbe manometra slijedi izraz za protok idealnog fluida:

$$Q_{id} = \frac{d_0^2 \cdot \pi}{4} \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h \cdot \left(\frac{\rho^0}{\rho} - 1\right)}{1 - \left(\frac{d_0}{d_1}\right)^4}}$$

Protok realnog fluida viskoznosti μ je

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

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



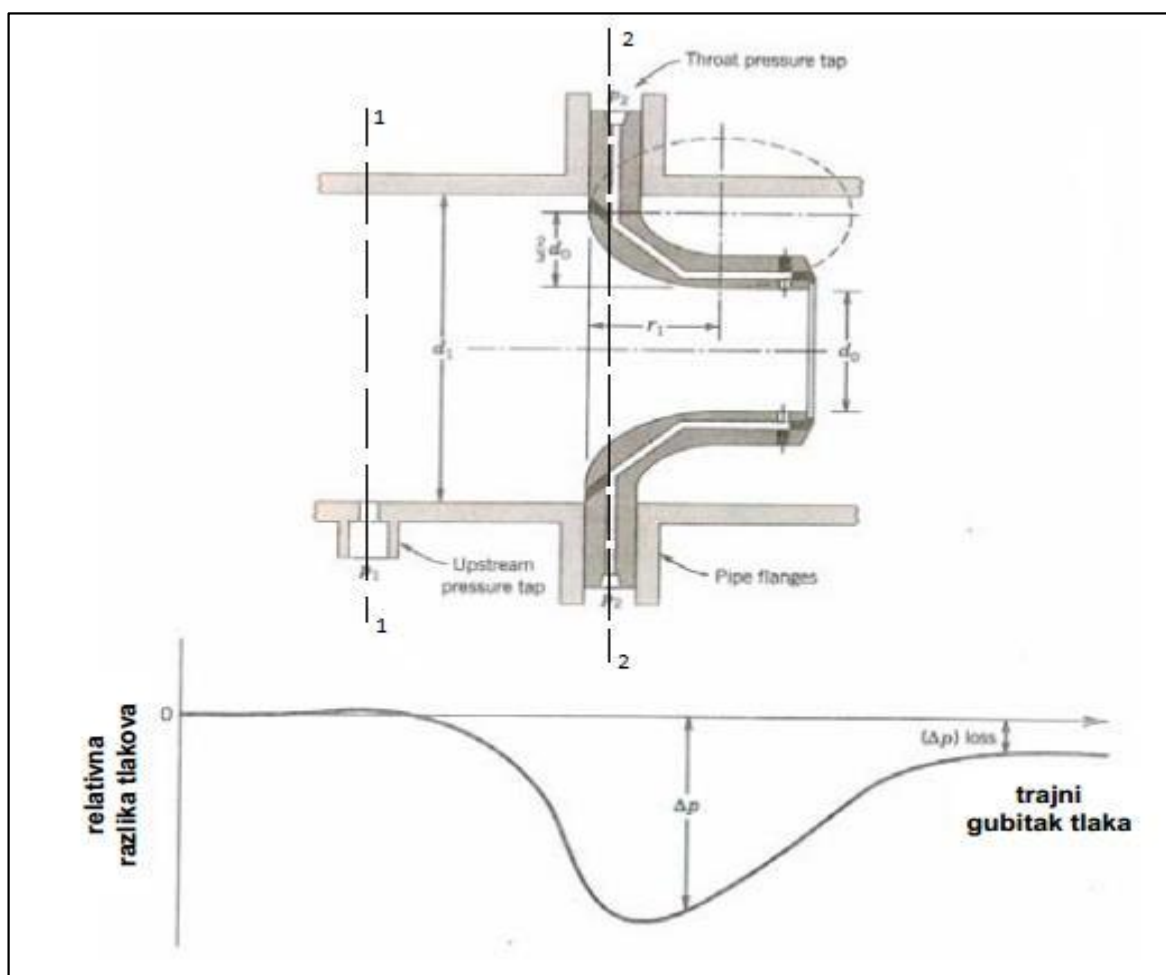
Slika 7. Zavisnost koeficijenta brzine C_v Venturijeve cijevi u ovisnosti o Reynoldsovom broju Re_1

2.2.3 Mjerna sapnica

Mjerne sapnice se upotrebljavaju mnogo rjeđe 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 mjerenje protoka lagano muljevutih fluida.

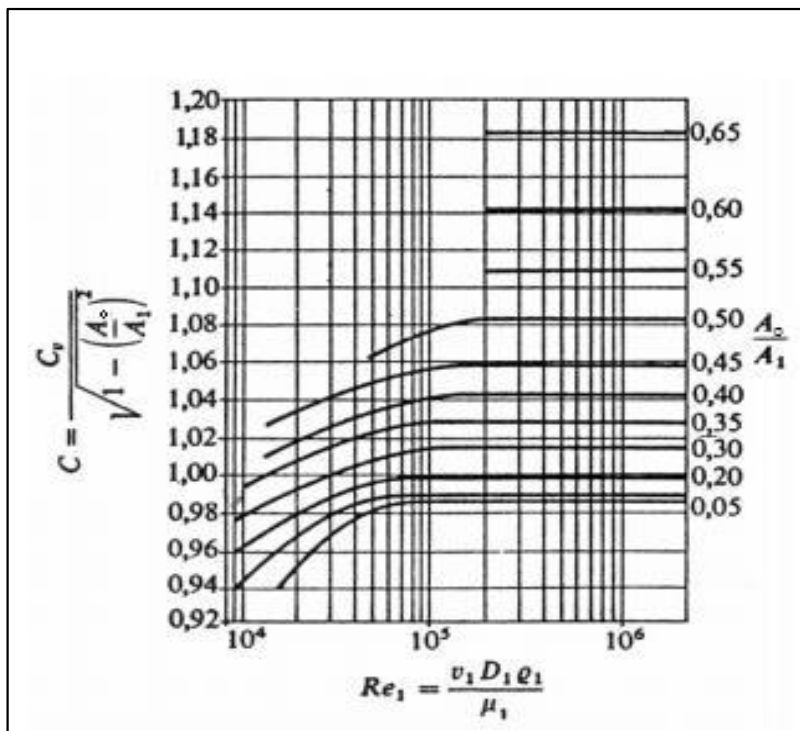
Mjerna sapnica prikazana je na slici 8. Primjenom jednadžbe kontinuiteta i Bernoullijeve jednadžbe, dobiva se izraz za protok

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



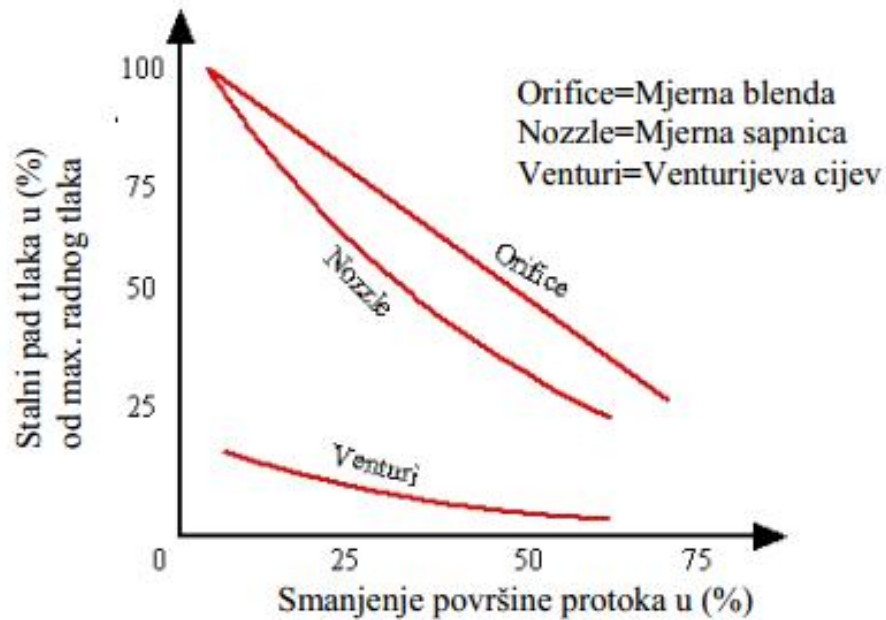
Slika 8. Mjerna sapnica

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 koeficijenta protoka C mjerne sapnice u ovisnosti o Reynoldsovom broju Re_1 ulaznog strujanja

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



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

3. Opis provedenih mjerenja

3.1 Prikaz mjerne linije



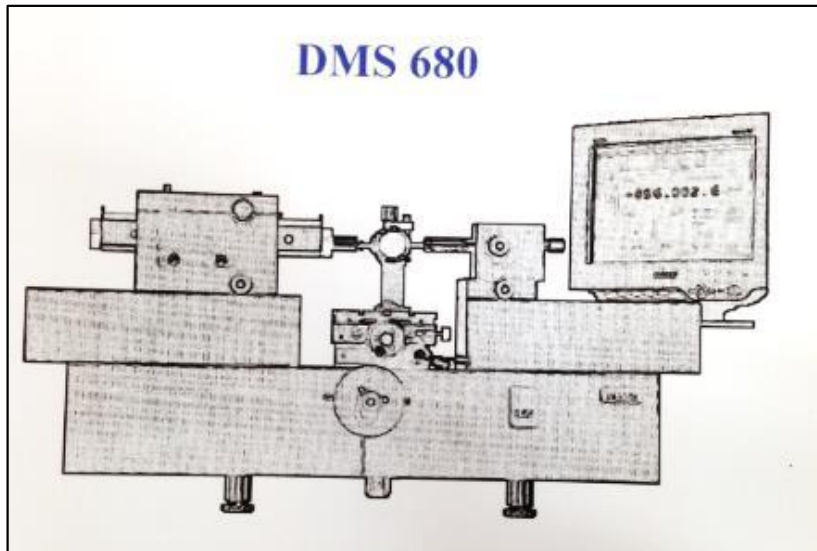
Slika 10. Prikaz mjerne linije

3.2 Opis mjerenja

Prije samog početka mjerenja 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 mjerenja, prigušnica je odnijeta na mjerenje unutarnjeg promjera u Nacionalni laboratorij za duljinu. Mjerenje je provedeno pomoću preciznog jednoosnog mjernog uređaja u točno četiri mjerenja te je izračunata srednja vrijednost unutarnjeg promjera kojeg ćemo koristiti u daljnjem proračunu. Nakon provedenog mjerenja 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 mjerenja je bila istiskivanje zraka iz cvjevovodnog sustava pomoću ventila za odzračivanje zbog što preciznijeg mjerenja. Zatim je uslijedilo puštanje u rad mjerne linije uključivanjem pumpe na trofaznu struju te provjera da li sve funkcionira. Cilj našeg zadatka jest dobiti potrebnu razliku tlaka na prigušnici pomoću koje možemo dobiti maseni protok, odnosno brzinu. Mjerenje ćemo izvršiti pomoću preciznog pretvornika tlaka koji će mjereni tlak pretvoriti u električni signal proporcionalan mjerenom tlaku. Mjerenje ćemo provesti u 5 točaka te na temelju toga iscrtati dijagram koji će se usporediti s dijagramom dobivenim pomoću mjerenja tlaka na U-cijevi. Za dodatnu provjeru dobivenih rezultata uvest ćemo mjerenje protoka pomoću ultrazvučnog protokomjera kojim ćemo donijeti konačan zaključak.

3.2 Specifikacije uređaja korištenih tijekom mjerenja

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: $0.1\mu\text{m} \div 0.01\mu\text{m}^3$
- Apsolutni mjerni raspon: 100 mm
- Diferencijalni mjerni raspon(vanjski): 680 mm
- Mjerenje sile: $0 \div 2.5\text{ N}$
- Radni stol: $160 \times 160\text{ mm}$

2. Pretvornik tlaka LPM/LPX 9000



Slika 12. LMP/LPX 9000

Tehničke specifikacije:

- Proizvođač: Druck
- Strujni izlazni signal: 4 – 20 mA
- Mjerno područje: 0-10 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



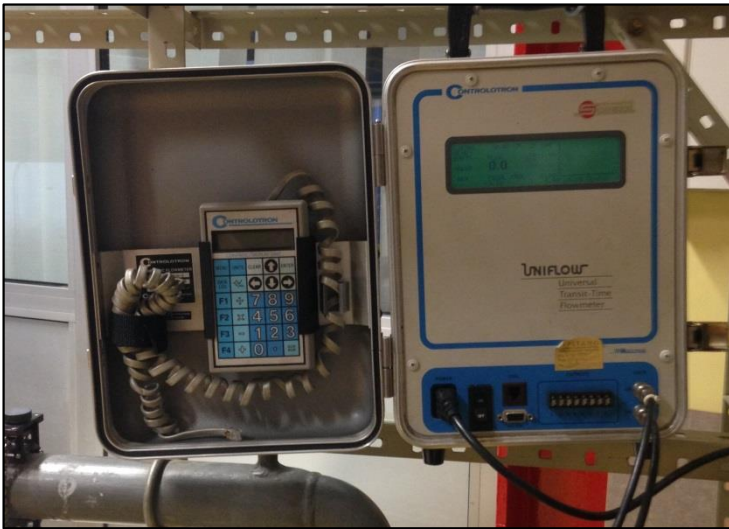
Slika 13. Mjerna prigušnica

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

Tablica 1. Vrijednosti promjera oštre 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 mjerenja protočne količine pomoću oštre prigušnice prema ISO 5167-2:2003

Opći izraz za izračunavanje masenog protoka pomoću oštre 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 (-),
- ε - faktor ekspanzije (-),
- $\frac{d^2 \cdot \pi}{4}$ - površina presjeka svijetlog otvora prigušnice u pogonskom stanju (m^2),
- ρ - gustoća fluida čiji se protok mjeri uzstrujno od mjerne prigušnice (kg/m^3),
- Δp - razlika tlakova neposredno ispred i iza prigušnice $\Delta p = p_1 - p_2$ (Pa).

Na temelju provedenih eksperimenata za oštre prigušnice kod kojih su priključci za mjerenje 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 svijetlih otvora prigušnice odnosno cjevovoda u koji je prigušnica ugrađena (-),
- $Re = \frac{w_1 \cdot D}{\frac{\mu}{\rho}}$ - Reynoldsova značajka strujanja u cjevovodu ispred prigušnice (-),
- w_1 - srednja brzina strujanja fluida u cjevovodu ispred prigušnice,
- D - promjer cjevovoda u pogonskom stanju,

- μ - 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 svijetlih otvora prigušnice i cjevovoda izmjereni pri temperaturi okoline t_0 (mm),
- α_d i α_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 ε 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 mijenjaju gustoću tj. specifični volumen. Faktor ekspanzije ε 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 mjernjoj prigušnici može zanemariti uzima se $\varepsilon=1$. Osim o veličini pada tlaka koeficijent ekspanzije ε ovisi i o eksponentu izentropske ekspanzije κ . Za nekompresibilne fluide $\kappa=\infty$ te je $\varepsilon=1$.

Empirijska jednadžba dobivena eksperimentalnim putem glasi:

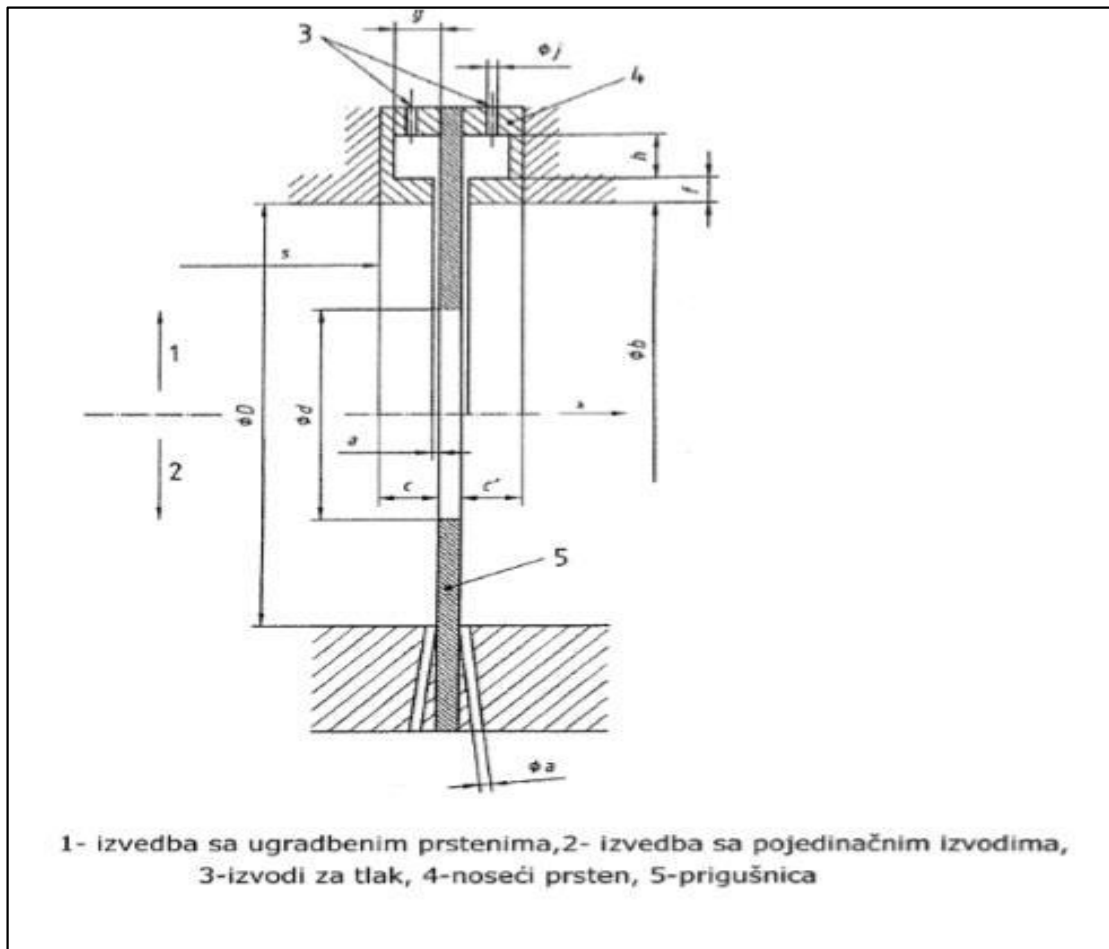
$$\varepsilon = 1 - (0,351 + 0,256 \cdot \beta^4 + 0,93 \cdot \beta^8) \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \right]$$

pri čemu su:

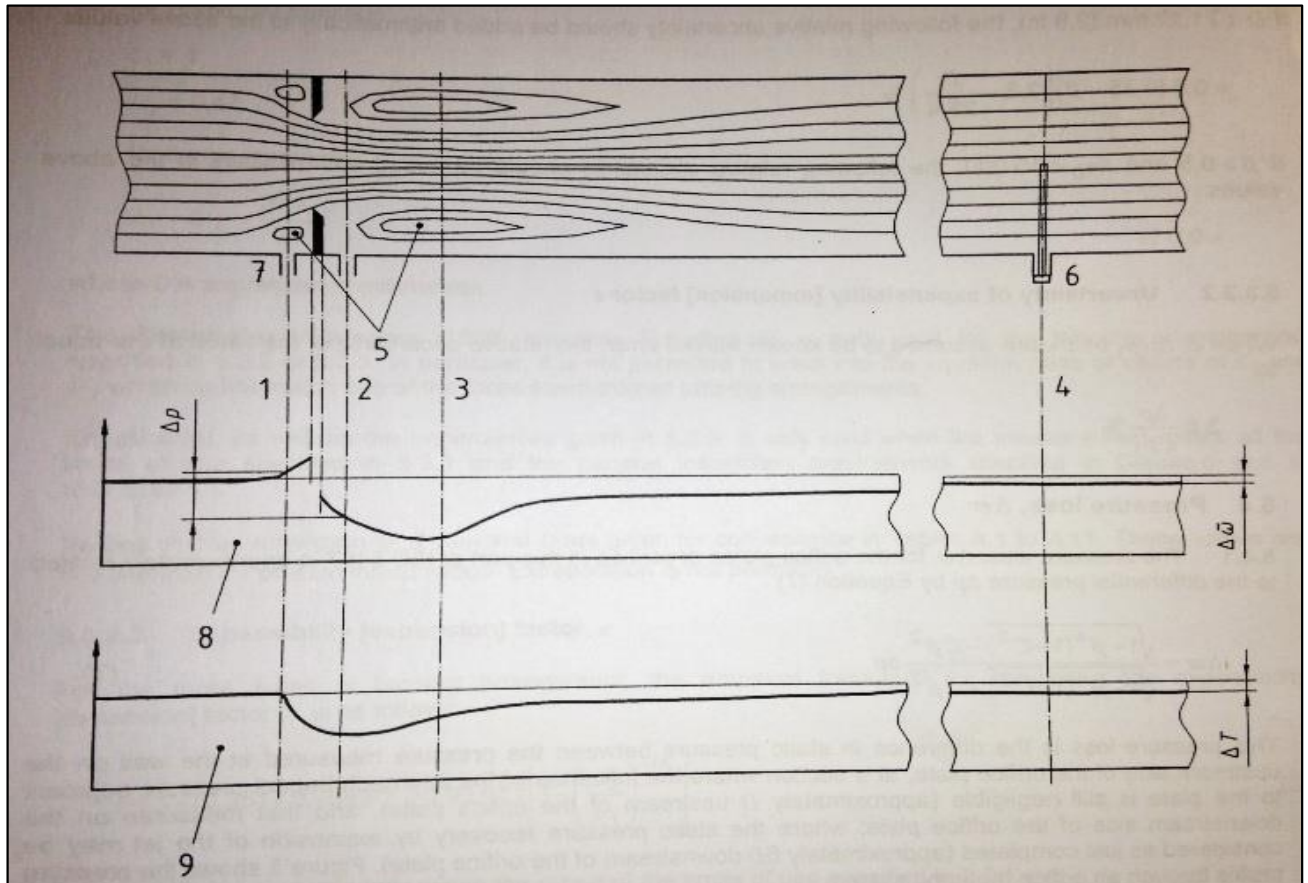
- p_1 i p_2 statički tlakovi u cjevovodu ispred i iza prigušnice (Pa)
- κ eksponent izentropske ekspanzije

Ograničenja uz koja vrijedi primjena navedenih jednadžbi za mjerenje protoka pomoću oštre prigušnice glase:

- ograničenja u pogledu d , D i β :
 - $d \geq 12,5 \text{ mm}$
 - $50 \leq D \leq 1000 \text{ mm}$
 - $0,23 \leq \beta \leq 0,80$
- ograničenja u pogledu Re_D i β dana su u točki 5.3.1. norme
- ograničenja u pogledu hrapavosti dana su u točki 5.3.1. norme
- faktor ekspanzije ε 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 mjerenje tlaka
- 2 - Ploča nizvodnih priključaka za mjerenje tlaka
- 3 - Ploča „vena contracta“ (najveće brzine)
- 4 - Ploča za temperaturnu sondu
- 5 - Sporedna područja protoka
- 6 - Utor za termometar
- 7 - Priključci za mjerenje tlaka
- 8 - Raspodjela tlaka na stijenci
- 9 - Prosječna raspodjela temperature

5. Rezultati mjerenja

5.1. Rezultati mjerenja za gustoću vode pri 20 °C

Poznati podaci:

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

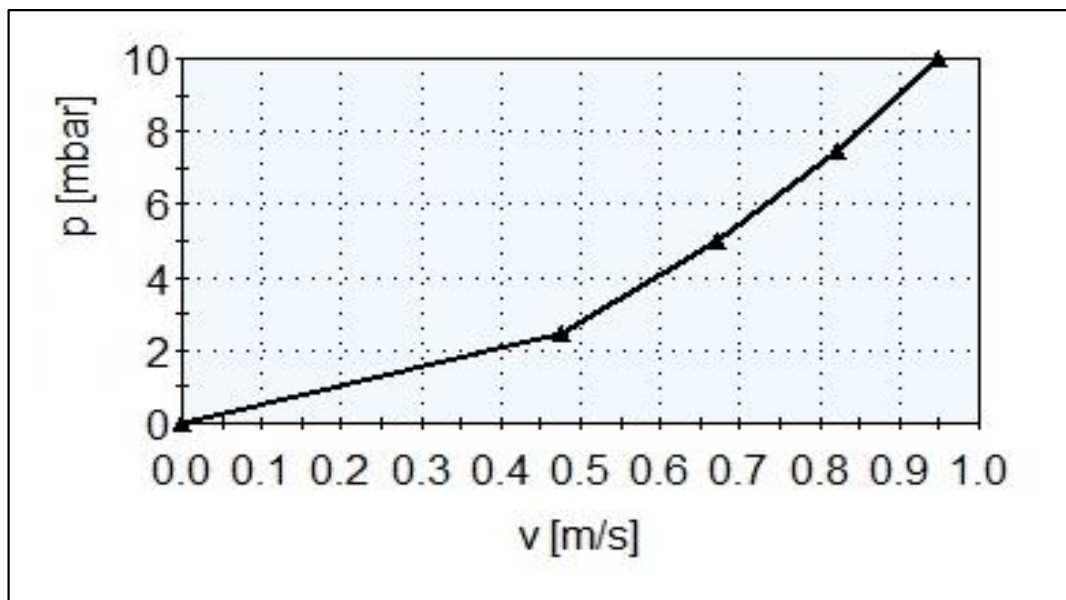
$$\mu_{20^{\circ}\text{C}} = 1.003 \cdot 10^{-3} \text{ Pas}$$

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

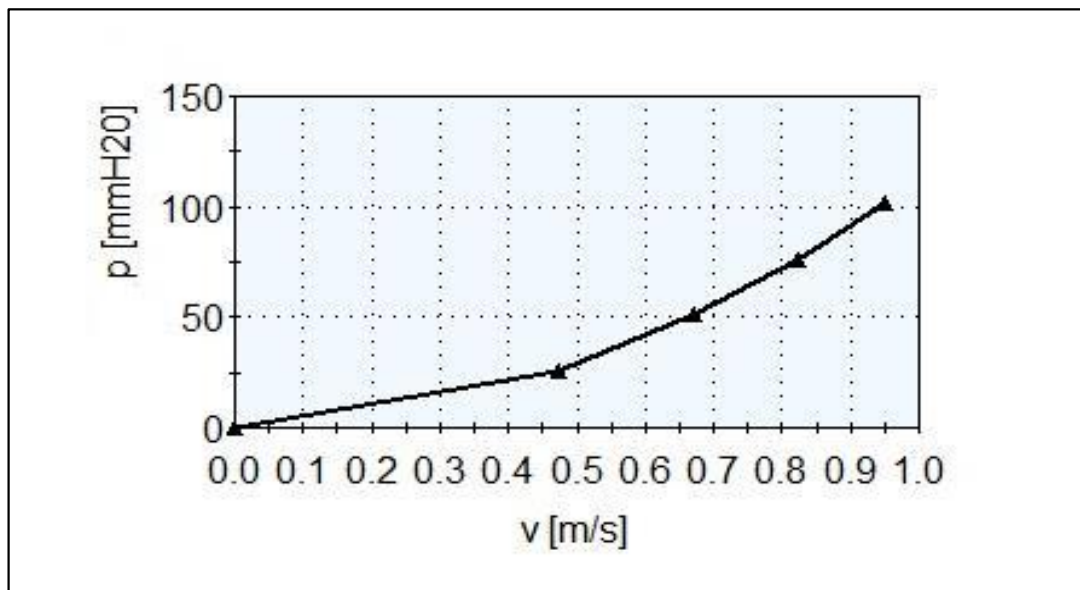
$$d = 31.17 \text{ mm}$$

Tablica 2. Rezultati mjerenja pri temperaturi vode od 20°C

Redni broj mjerenja	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 mjerenja za gustoću vode pri 25 °C

Poznati podaci:

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

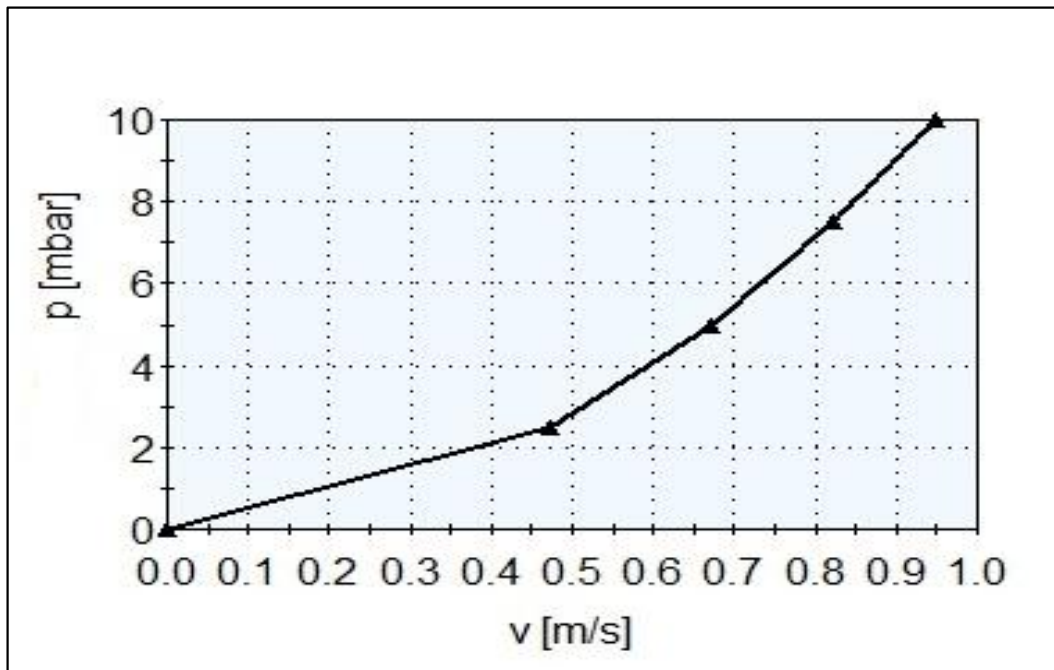
$$\mu_{25^{\circ}\text{C}} = 8.9 \cdot 10^{-4} \text{ Pas}$$

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

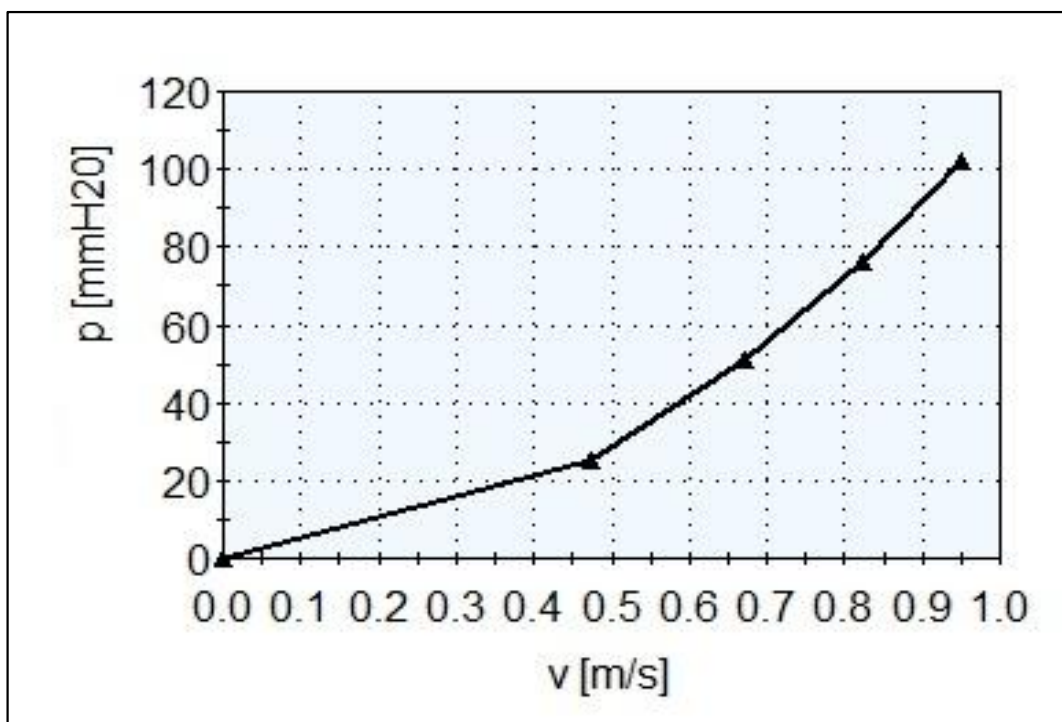
$$d = 31.17 \text{ mm}$$

Tablica3. Rezultati mjerenja pri temperaturi vode od 25°C

Redni broj mjerenja	I [mA]	Δp [mbar]	Δp [Pa]	Δp [mmH ₂ O]	qm [kg/s]	qv [m ³ /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

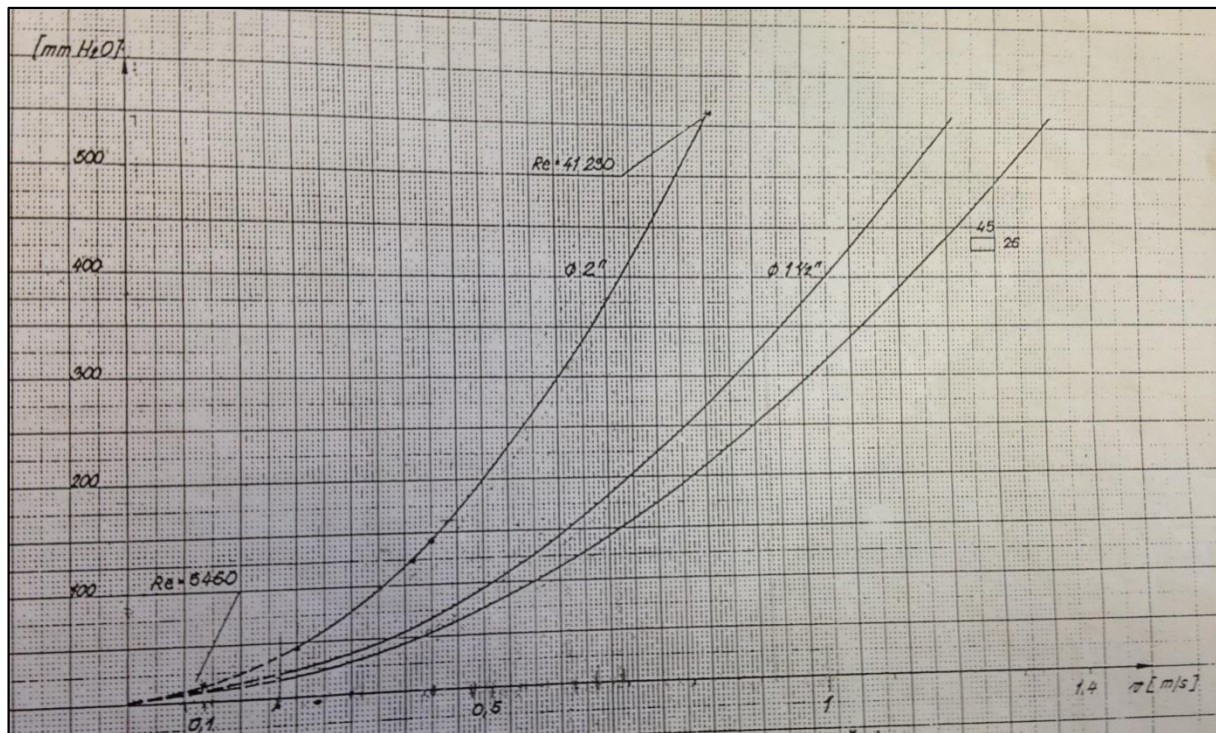


Dijagram 4. Karakteristika prigušnice prikazana ovisnošću brzine i tlaka[mbar] pri 25°C



Dijagram 5. Karakteristika prigušnice prikazana ovisnošću brzine i tlaka[mmH₂O] pri 25°C

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



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

Dobivene dijagrame 2. i 4. uspoređujemo s dijagramom 5. u mjernom području od 0-100 mm H₂O jer smo prilikom našeg mjerenja koristili pretvornik tlaka s rasponom od 0-10 mbar, odnosno 0-100 mm H₂O. 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]	Δp [mmH2O]	Δp [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]	Δp [mmH2O]	Δp [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 mjerenja 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 mjerenje protoka ultrazvučnim protokomjerom vrlo nesigurno i netočno za neka ozbiljnija mjerenja. Zbog ovakvih slučajeva za preciznija i sigurnija mjerenja usmjeravamo se na oštru prigušnicu korištenu u glavnom dijelu našeg zadatka.

6. Zaključak

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

Nakon teorijskog uvoda, upoznavanja sa metodama i načinima mjerenja krenulo se mjerenju koristeći mjernu opremu u Laboratoriju za procesna mjerenja. Nakon opisa postupka navedeni su svi uređaji koji su korišteni tijekom mjerenja te definirani uvjeti u kojima su mjerenja izvršena. S dobivenim rezultatima protoka na oštroj prigušnici možemo zaključiti kako je ova metoda mjerenja dovoljno sigurna i precizna za male padove tlakova, dok za veće padove potrebno je imati bolje pretvornike koji ujedno povećavaju troškove mjerenja. U radu je prikazan i utjecaj promjene gustoće vode zbog povećanja temperature za 5°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 mjerenje oštrom prigušnicom.

Za kraj mogu reći da sam vrlo zadovoljan postignutim rezultatima i da sam radeći ovaj rad upoznao neke nove metode mjerenja. 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 mjerenja u energetici*, FSB-LPM, 2009./2010.

[2] Virag Z., *Mehanika fluida: Odabrana 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

[6]

http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zvd_teh_term_energ/nas/laboratorijske_vjezbe_%207/5_brzina_strujanja.pdf

[7] https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/Mjerenje-Protoka.pdf

[8] http://www.wermac.org/steam/steam_venturi.html