

Određivanje protočne količine mjernom prigušnicom

Baršun, Vinko

Undergraduate thesis / Završni rad

2011

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:235:483375>

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

Vinko Baršun

Zagreb, 2011.
Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:

Doc. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec
Baršun

Vinko

Zagreb, 2011.

SAŽETAK

Osnovni zadatak ovog rada je izraditi postupak mjerenja protocnih kolicina mjernom prigušnicom u cijevi okruglog presjeka. U tu svrhu korištena je postojeća mjerna oprema Laboratorija za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Kod mjerenja protoka mjernom prigušnicom koristili smo se različitim položajima usisnog poklopca ventilatora za određivanje različitih protoka te mjernih nesigurnosti. Rad se temelji na NORMI ISO5167-2:2003 po kojoj smo proveli postupak mjerenja. U svrhu što bolje usporedbe rezultata, korišteno je više razlicitih mjernih instrumenata, primjerice mikromanometar i diferencijalni pretvornik tlaka za odredivanje dinamičkog tlaka zraka u cijevi. U radu su tablicno prikazana sva mjerenja, dijagrami kao i proračun protoka.

SADRŽAJ

Popis slika	5
Popis tablica	6
Popis dijagrama	7
Popis oznaka	8
1. UVOD	10
1.1. Podjela metoda mjerenja protoka	11
2. TEORIJSKE OSNOVE METODA MJERENJA PROTOKA TEMELJENE NA RAZLICI TLAKOVA	12
2.1. Bernulijeva jednadžba	13
2.1.1. Utjecajni faktori	14
2.2. Mjerenje brzine strujanja Venturijevom cijevi	15
2.3. Mjerenje brzine strujanja mjernom sapnicom	17
2.4. Mjerenje brzine strujanja mjernom prigušnicom	19
3. OPIS PROVEDENIH MJERENJA	21
3.1. Prikaz mjerene linije	21
3.2. Specifikacije uređaja korištenih tijekom mjerenjima	22
3.3. Opis mjerenja	24
3.4. Proračun protoka zraka u cjevovodu	25
3.4.1. Proračun pomoću mikromamometra	25
3.4.2. Proračun pomoću diferencijalnog pretvornika tlaka	27
3.5. Gustoća zraka koji struji u cijevi:	29
3.6. Brzina zraka koji struji kroz cijev:	29
3.7. Volumni protok zraka u cjevovodu:	29
4. NORMA ISO5167-2:2003	30
4.1. Pregled jednadžbi kod mjerenja protočne količine pomoću oštre prigušnice prema ISO 5167-2 : 2003	30
4.2. Ograničenja uz koja vrijedi primjena navedenih jednadžbi za mjerenje protoka pomoću oštre prigušnice glase:	32
5. REZULTATI MJERENJA I MJERNA NESIGURNOST	34
5.1. Rezultati mjerenja	34
5.2. Mjerna nesigurnost	37
6. ZAKLJUČAK	42
7. POPIS LITERATURE	43

Popis slika

Slika 1.: Mjerni uređaj	12
Slika 2.: Opis Bernulijeve jednadžbe	13
Slika 3.: Prikaz osnovnih tipova strujanja	15
Slika 4.: Venturijeva cijev	16
Slika 5.: Dijagram koeficijenta brzine C_v Venturijeve cijevi u ovisnosti o	17
Slika 6.: Mjerna sapnica	18
Slika 7.: Dijagram koeficijenata protoka C mjerne sapnice u ovisnosti o Reynoldsovom broju Re_1 ulaznog strujanja	18
Slika 8.: Mjerna prigušnica	20
Slika 9.: Dijagram koeficijenata C mjerne dijafragme o u ovisnosti o Reynoldsovom	20
Slika 10.: Shema mjerne linije	21
Slika 11.: Slika mjerne linije	22
Slika 12.: Usisni dio ventilatora	25
Slika 13.: Mikromanometar	26
Slika 14.: Ovisnost tlaka o jakosti struje kod mjerenja diferencijalnim pretvornikom tlaka	28
Slika 15.: Detalji oštre prigušnice	33

Popis tablica

Tablica 1.: Prvo mjerenje ulaznih vrijednosti na mjernoj liniji	34
Tablica 2.: Dobiveni rezultati prvoga mjerenja	34
Tablica 3.: Drugo mjerenje ulaznih vrijednosti na mjernoj liniji	35
Tablica 4.: Dobiveni rezultati drugog mjerenja	35
Tablica 5.: Treće mjerenje ulaznih vrijednosti na mjernoj liniji	36
Tablica 6.: Dobiveni rezultati trećeg mjerenja	36
Tablica 7.: Mjerna nesigurnost kod mjerenja diferencijalnim pretvornikom tlaka	38
Tablica 8.: Mjerena nesigurnost kod mjerenja mikromanometrom	39
Tablica 9.: Razlike u izračunu protoka nakon svakog mjerenja	39
Tablica 10.: Razlike u očitavanju mjerenja diferencijalnog pretvornika i mikromanometra	40

Popis dijagrama

Dijagram 1.: Promjene unutarnje i vanjske temperature prilikom mjerenja	37
Dijagram 2.: Ovisnost pada tlaka na prigušnici o vanjskom tlaku	37
Dijagram 3.: Ovisnost protoka zraka o otvoru za usis zraka	38
Dijagram 4.: Razlike u očitavanju struje pri sva tri mjerenja	39
Dijagram 5.: Razlike u izračunu protoka	40
Dijagram 6.: Razlike u očitavanju mjerenja diferencijalnog pretvornika i mikromanometra	40
Dijagram 7.: Ovisnost pada tlaka o protoku zraka	41

Popis oznaka

Latinične oznake

<u>Oznaka</u>	<u>Jedinica</u>	
<i>A</i>	m ²	površina
<i>C</i>	-	koeficijent protjecanja
<i>C_c</i>	-	koeficijent korekcije mlaza
<i>C_d</i>	-	koeficijent korekcije protoka
<i>C_v</i>	-	koeficijent korekcije brzine

D	m	vanjski promjer cijevi
d	m	unutrašnji promjer cijevi
E	-	koeficijent pristupne brzine
g	m/s^2	gravitacijska konstanta
h	m	otvorenost cilindra
I	A	jakost struje
I	A	srednja jakost struje
k	-	Nagib mikromanometra
l	m	otklon tekućine u mikromanometru
lsr	m	srednji otklon tekućine u mikromanometru
p	Pa	tlak
p_o	Pa	okolišni tlak
p_d	Pa	dinamički tlak
p_s	Pa	statički tlak
p_t	Pa	totalni (ukupni) tlak
qm	kg/s	maseni protok
qv	m^3/s	volumni protok
Q_{id}	m^3/s	idealni protok
Q_s	m^3/s	stvarni protok
R	J/(kgK)	Specifična plinska konstanta
Re	-	Reynoldsova značajka
t_v	°C	Vanjska temperatura
t_u	°C	Unutarnja temperatura
T	K	termodinamička (apsolutna) temperatura
w	m/s	brzina

Grčke oznake

<u>Oznaka</u>	<u>Jedinica</u>
a	- koeficijent protoka
aD, ad	m/mK linearni koeficijent temperaturnog istezanja
β	- omjer unutarnjeg i vanjskog promjera
D	- razlika (diferencija)
e	- koeficijent ekspanzije
μ	Pa s dinamički viskoznost
n	m ² /s kinematički viskoznost
ρ	kg/m ³ gustoća
ρ_{al}	kg/m ³ gustoća alkohola
ρ_{zr}	kg/m ³ gustoća zraka
τ	- vrijeme potrebno za put od 100 m

1.

UVOD

Napori za kontrirano mjerenje protočnih količina veoma su stari.

Još 150 B.C. Hero iz Aleksandrije je predložio shemu reguliranja protoka vode u kojoj je sifon bio priključen na spremnik s konstantnom razinom

Rimljani su razvili složene sustave opskrbe vodom u javnim kupalištima ali i u privatnim kućama

A.D. 40-103 Sextus Frontinius, zadužen za sustav vodoopskrbe u Rimu izabrao je metode za distribuciju vode iz kojih je jasno da su Rimljani razumjeli 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.

Benedetto Castelli, učenik Galilea, također Isaac Newton, Daniel Bernoulli i Leonard Euler su razvili matematičke i fizičke osnove na kojima su se razvijali mjerači protoka.

Tek 1887. je Herschel konstruirao prvu Venturijevu cijev, a 1896. Max Gehre je patentirao mjernu prigušnicu.

Komercijalna upotreba započela je 1909., uskoro nakon toga tvrtke za proizvodnju ulja i nafte započiju njihovu upotrebu zbog niske cijene i lakog održavanja.

1.1. Podjela metoda mjerenja protoka

1. Primarne količinske metode

- a) Spremnici poznate mase ili volumena
- b) Mjerači na principu pozitivnog ispušnog volumena (positive-displacement)

2. Mjerači protoka

- a) Mjerna prigušnice, sapnice ili venturi-mlaznice
- b) Mjerači s varijabilnim poprečnim presjekom
- c) Turbinski ili propelerni mjerači
- d) Magnetski mjerači (samo za tekućine)
- e) Stvaraoci vortexa

3. Mjerači brzine

- a) Probe za tlak Pitot, probe za statički tlak, probe za ukupni tlak
- b) Anemometri s vrućom žicom ili vrućim filmom
- c) Laserski Doppler anemometar (LDA)
- d) Ultrazvučni anemometar

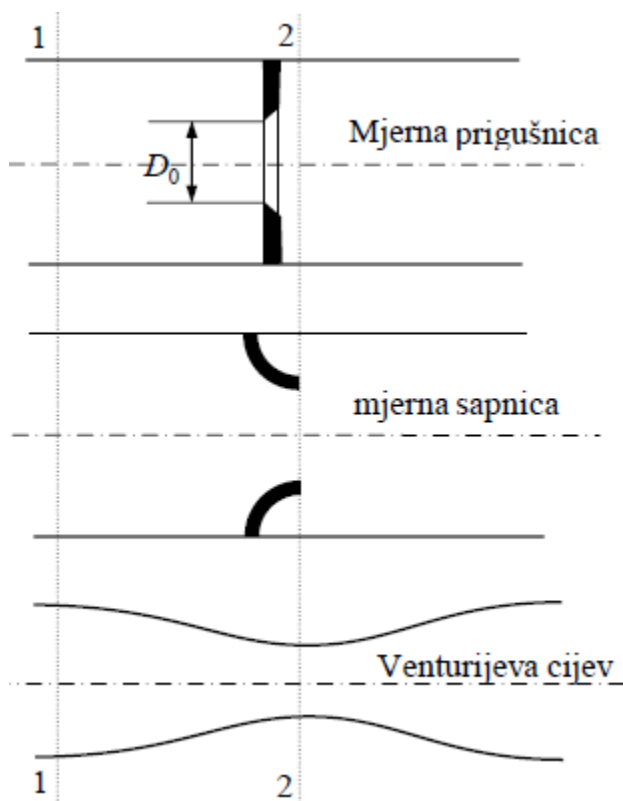
4. Tehnike vizualizacije protoka

2. TEORIJSKE OSNOVE METODA MJERENJA PROTOKA TEMELJENE NA RAZLICI TLAKOVA

Uređaji za mjerenje protoka smješteni u struju fluida uzrokuju lokalni pad tlaka, odnosno stvaraju razliku tlakova prije i poslije uređaja.

Najčešće se upotrebljavaju primarni uređaji prikazani na slici 1:

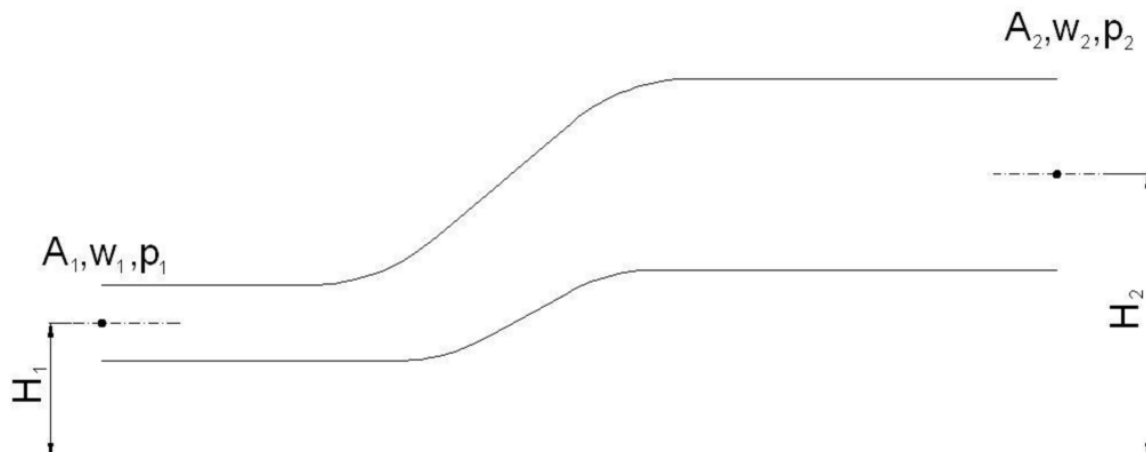
- mjerna prigušnica
- mjerna sapnica
- Venturijeva cijev



Slika 1.: Mjerni uređaj

2.1. Bernulijeva jednadžba

Mnoge metode mjerenja protoka temelje se na Bernoullijevoj jednadžbi. Na slici 3. prikazana je cijev kroz koju struji nekompresibilna tekućina. Brzina i promjer cijevi su takvi da je strujanje turbulentno ($Re > 4000$).



Slika 2.: Opis Bernulijeve jednadžbe

Zbog nekompresibilnosti fluida, maseni protok u presjeku 1 jednak je onome u presjeku 2, tj.:

$$\rho \cdot A_1 \cdot w_1 = \rho \cdot A_2 \cdot w_2 \quad (1)$$

Povrh toga, ukupna količina energije (potencijalna i kinetička) je konstantna.

Iz tih jednadžbi dobiva se Bernoullijeva jednadžba koja glasi:

$$\rho + \rho \cdot g \cdot H + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w^2 = konst. \quad (2)$$

Zbroj $\rho + \rho \cdot g \cdot H$ predstavlja statički, a član $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w^2$ dinamički tlak u sustavu.

Iz jednadžbe kontinuiteta i Bernoullijeve jednadžbe može se zaključiti slijedeće: na mjestu gdje je brzina strujanja najveća, statički tlak mora biti najmanji, i obrnuto. Prema tome, Bernoullijeva jednadžba daje odnos između brzine strujanja fluida i pripadnog statičkog tlaka.

2.1.1. Utjecajni faktori

Faktori koji mogu imati utjecaj na protok su viskoznost i trenje medija koje nastaje njegovim strujanjem kroz cijev.

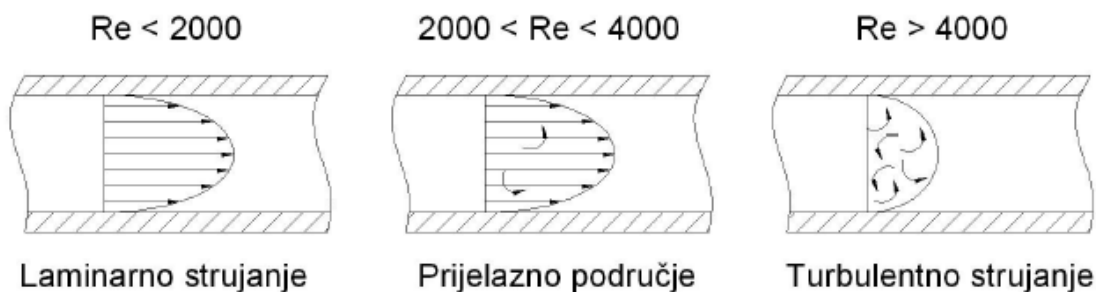
Iznos protoka jako ovisi o bezdimenzionalnom parametru, Reynoldsovom broju, koji je definiran kao omjer inercijske i viskozne sile:

$$Re = \frac{w \cdot D}{\nu} = \frac{w \cdot D \cdot \rho}{\mu} \quad (3)$$

- Re* - Reynoldsov broj
- w* - brzina strujanja [m/s]
- D* - promjer cijevi [m]
- ν* - kinematička viskoznost [m²/s]
- ρ* - gustoća fluida [kg/m³]
- μ* - dinamička viskoznost [Pa s]

Pri malim brzinama strujanja ili kod fluida s visokom viskoznosti, Reynoldsov broj ima male vrijednosti i strujnice su međusobno paralelne, odnosno čestice fluida u jednoj strujnici međusobno se ne miješaju sa česticama iz drugih strujnica. U tom slučaju fluid ima maksimalnu brzinu u osi cijevi, dok je na stjenci brzina jednaka nuli i takvo strujanje naziva se laminarno strujanje i Reynoldsov broj poprima vrijednosti do oko 2000. Profil brzina laminarnog strujanja ima karakter rotacijskog paraboloida (Slika 3).

Mnogo je češći slučaj kada vrijednosti Reynoldsovog broja prelaze 4000 i tada se javlja strujanje koje se naziva turbulentno strujanje, a obično je uzrokovano velikim brzinama i malim iznosima viskoznosti. Karakteristika tog tipa strujanja je poprečno gibanje cestica fluida i što je turbulencija veća, intenzivnije je i miješanje cestica. Između laminarnog i turbulentnog strujanja nalazi se prijelazno područje ($2000 < Re < 4000$), u kojem se laminarno strujanje postupno mijenja u turbulentno (Slika 3). [2]



Slika 3.: Prikaz osnovnih tipova strujanja

2.2. Mjerenje brzine strujanja Venturijevom cijevi

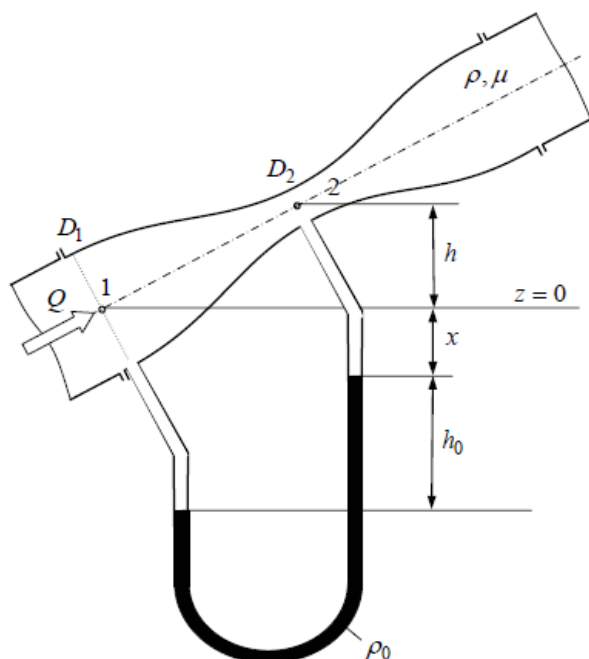
Venturijeva cijev kao na slici 4 služi za mjerenje protoka. Sastoji se od ulaznog dijela s ugrađenim piezometričkim prstenom, konvergentnog dijela, najužeg dijela (grla cijevi), također s piezometričkim prstenom, i blago divergentnog dijela. Ulazni dio i izlaz divergentnog dijela imaju promjer jednak promjeru cjevovoda u kojemu se mjeri protok. Diferencijalni manometar (hidrostatički ili metalni) postavljen je između dva piezometrička prstena. Radi točnosti mjerenja treba ispred Venturijeve cijevi postojati ravni dio cjevovoda duljine najmanje 10 promjera cijevi.

Izraz za idealni protok:

$$Q_{id} = \frac{D_2^2 \pi}{4 \sqrt{1 - \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^4}} \sqrt{2gh_0 \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1\right)} \quad (4)$$

dok je stvarni protok:

$$Q = C_c C_v Q_{id} \quad (5)$$



Slika 4.: Venturijeva cijev

Kod dobro izrađene Venturijeve cijevi

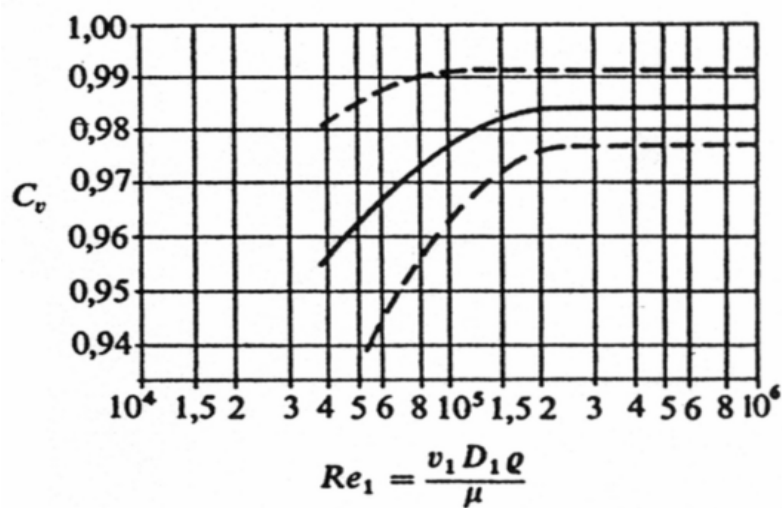
$$C_c = 1. \text{ Za } Re > 2 \cdot 10^5 \quad C_v \sim 0,984.$$

U dijagramu na slici 5 prikazani su podaci o koeficijentu brzine C_v na bazi

Reynoldsovog broja ulaznog strujanja Re_1 , dobiveni brojnim baždarenjima

Venturijevih cijevi. Dijagram vrijedi za odnose promjera $D_2/D_1 = 0,25 \div 0,75$, a

tolerancije su označene crtkanim krivuljama



Slika 5.: Dijagram koeficijenta brzine C_v Venturijeve cijevi u ovisnosti o Reynoldsovom broju Re_1 ulaznog strujanja

2.3. Mjerenje brzine strujanja mjernom sapnicom

Mjerna sapnica (Slika 6) radi na istom principu kao i Venturijeva cijev, samo mlaz iza grla nijevođen, već slobodno ulazi u cijev cjevovoda, što uzrokuje veće gubitka tlaka.

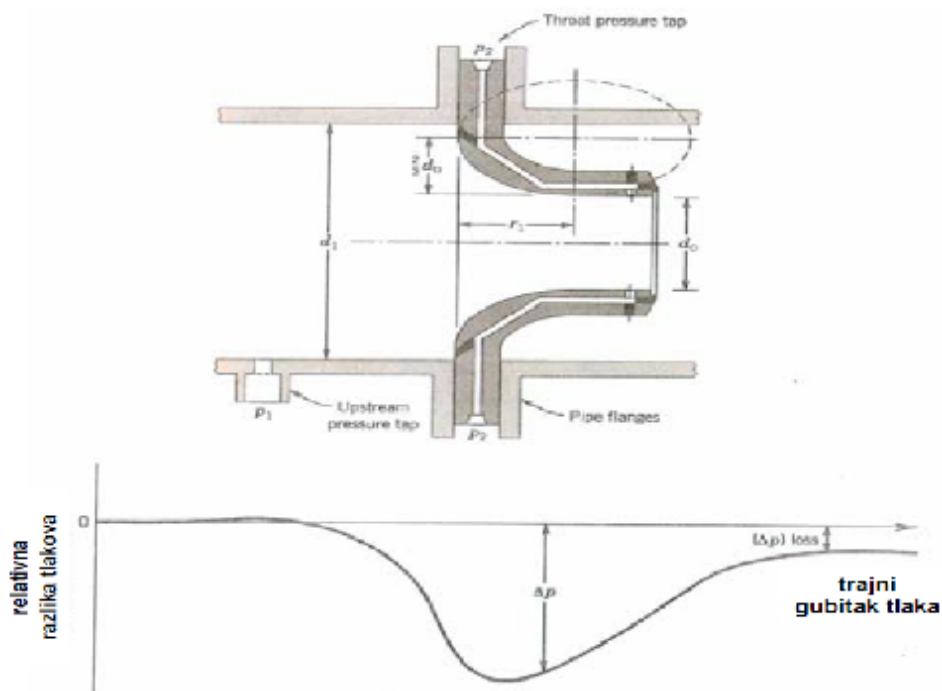
Mjerna sapnica je jeftinija od Venturijeve cijevi i zauzima manje prostora. Izraz za protok glasi:

$$Q = CA_2 \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)} \quad (6)$$

gdje je

$$C = \frac{C_v}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}}$$

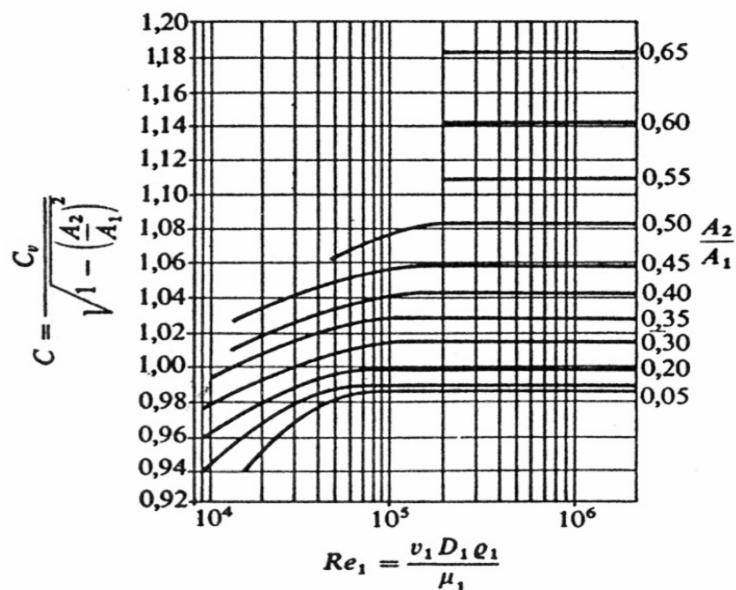
(7)



Slika 6.: Mjerna sapnica

Sapnica se koristi za mjerenje protoka u cjevovodima promjera $d_1 > 50$ mm.

Upotrebljavaju se rjeđe od mjernih prigušnica i imaju manje gubitke mehaničke energije.



Slika 7.: Dijagram koeficijenta protoka C mjerne sapnice u ovisnosti o Reynoldsovom broju Re_1 ulaznog strujanja

2.4. Mjerenje brzine strujanja mjernom prigušnicom

Mjerna prigušnica prikazana je na slici.

Koeficijent kontrakcije mlaza iza dijafragme definiran je odnosom:

$$C_c = \frac{A_2}{A_0} \quad (8)$$

gdje je A_2 presjek vene contracte iza dijafragme, a A_0 površina otvora dijafragme.

Primjenom jednadžbe kontinuiteta (1) i Bernoullijeve jednadžbe (2), te ako se uvede i koeficijent brzine C_v , dobiva se izraz za protok

$$Q = C_d \frac{A_0}{\sqrt{1 - C_c^2 \left(\frac{A_0}{A_1}\right)^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)} \quad (9)$$

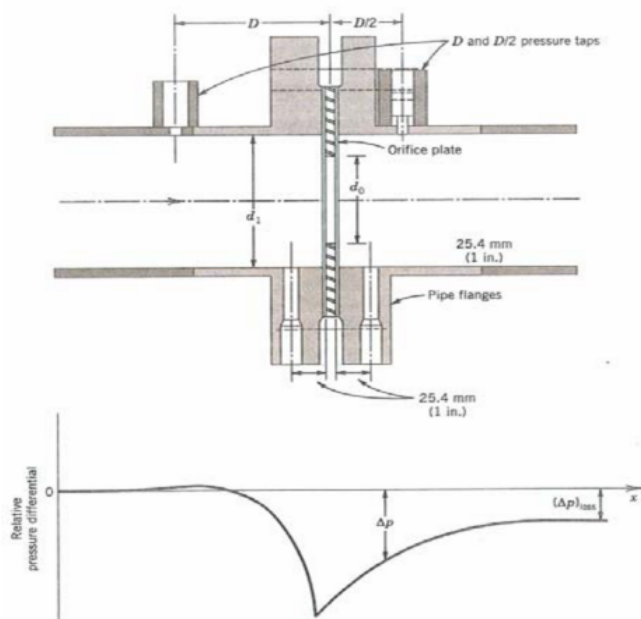
gdje je koeficijent protoka

$$C_d = C_c C_v \quad (10)$$

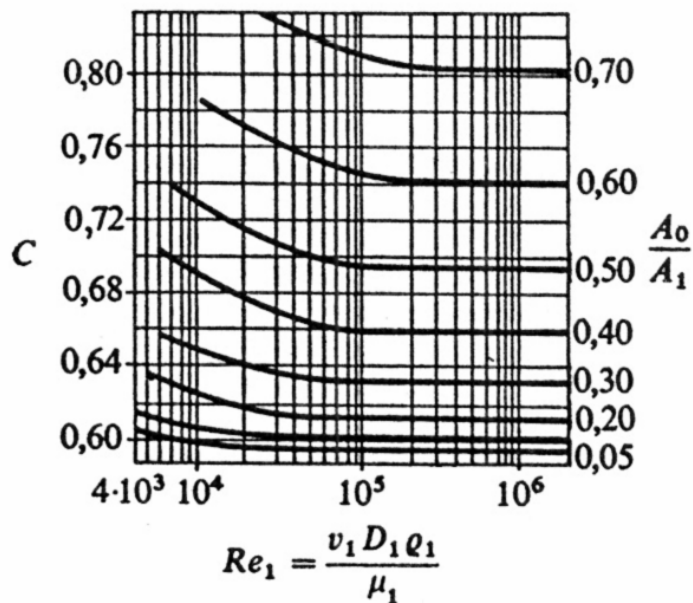
Kako bi se izbjeglo određivanje dvaju koeficijenata C_c i C_v , primjenjuje se jednostavnija formula:

$$Q = C A_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)} \quad (11)$$

gdje je za standardnu izvedbu mjerne dijafragme prikazan koeficijent C kao funkcija Reynoldsovog broja Re_1 i omjera A_0 / A_1



Slika 8.: Mjerna prigušnica

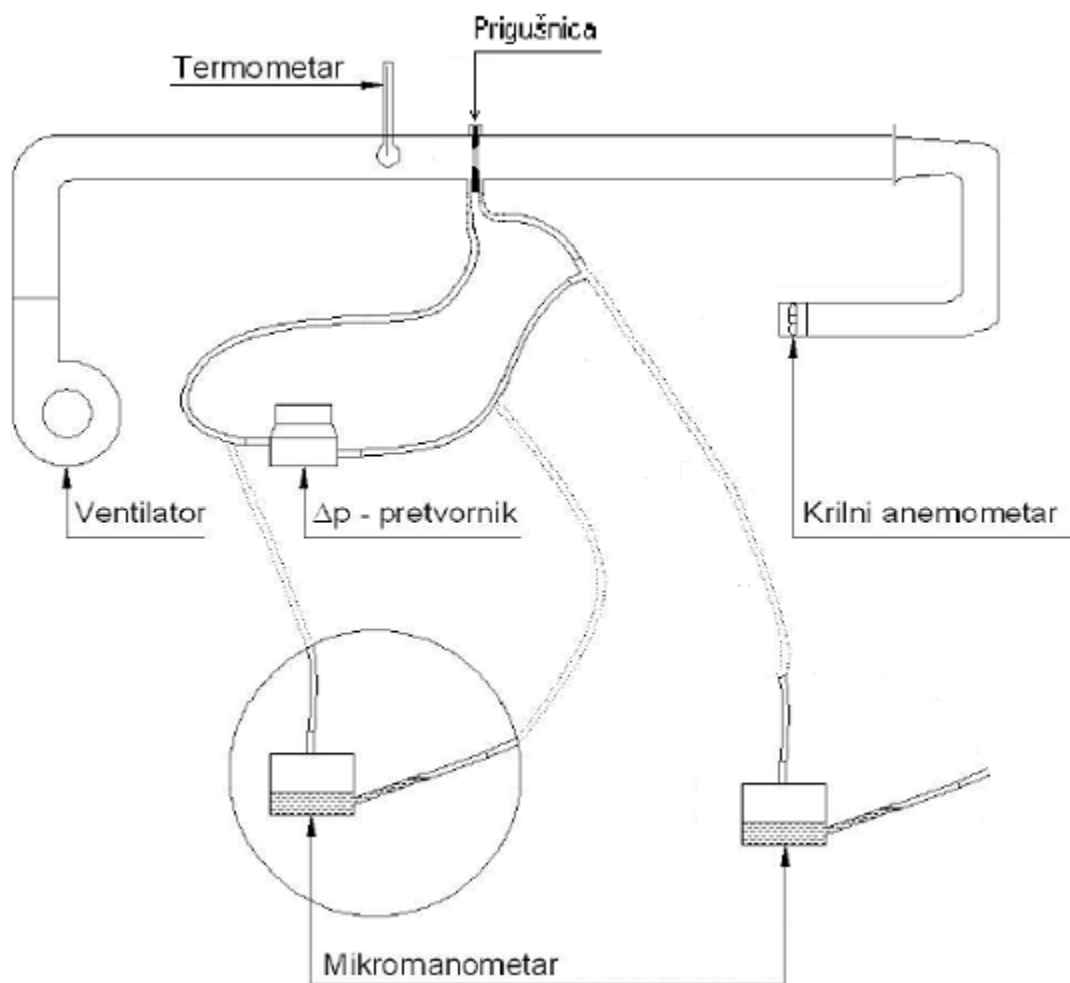


Slika 9.: Dijagram koeficijenta C mjerne dijafragme o u ovisnosti o Reynoldsovom broju Re_1 i omjeru A_0/A_1

3. OPIS PROVEDENIH MJERENJA

Mjerenja su provedena na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u laboratoriju za procesna mjerenja (LPM).

3.1. *Prikaz mjerene linije*



Slika 10.: Shema mjerne linije

Slika 10 prikazuje mjernu liniju sa svom pripadajućom opremom i instrumentima potrebnim za mjerenje protoka. Za mjerenje pada tlaka odabrali smo diferencijalni

pretvornik tlaka i mikromanometar.



Slika 11.: Slika mjerne linije

3.2. Specifikacije uređaja korištenih tijekom mjerenjima

1. MIKROMANOMETAR

Proizvodac: "Zakłady Cynkowe", Szopienice

Tip: MPR 3

Tvornicki broj: 237

Duljina skale: 210 mm

Podjela skale: po 1 mm

Prijenosni omjeri: $k= 1:2, 1:5, 1:10, 1:25, 1:50$

2. MJERNA PRIGUŠNICA

Prigušnica s oštrim rubom

Vanjski promjer: 200mm

Unutarnji promjer: 125.23 mm

3. TERMOMETAR

Izvedba: uložni

Vrsta stakla: jensko normalno

Punjenje: živa

Područje: 0 - 50 °C

Podjela: po 1/10 °C

Garantirane

granice pogrešaka: ± 0.15 °C

4. ANEROID

Proizvodac: "Fischer"

Promjer skale: 100 mm

Mjerno područje: 900 - 1060 mbar

Podjela: po 1 mbar

Garantirane

granice pogrešaka: ± 2 mbar

5. DIFERENCIJALNI PRETVARAČ TLAKA

Proizvodac: GE Druck

Mjerno područje: 0 - 10 mbar

Napon: 10 - 30 Vdc

Izlazni signal: 4 - 20 mA

Razred točnosti: – 0.2 % FS (0.2%od 10 mbar)

3.3. Opis mjerenja

Prije početka mjerenja smo napravili skalu raspona 60mm za odabir mjernih točaka pošto je za udaljenosti veće od 60 mm na mjernoj skali promjena tlaka zanemariva. Odabrali smo mjerne točke da budu 60 mm, 50 mm, 40 mm, 30 mm, 20 mm, 10 mm te 5 mm koje smo naknadno odlučili dodati radi točnijeg mjerenja i prikaza rezultata. Sljedeće što smo morali napraviti bilo je doljevanje alkohola u mjerni instrument zvan mikromanometar te postaviti mjernu skalu u odgovarajući položaj za mjerenje.

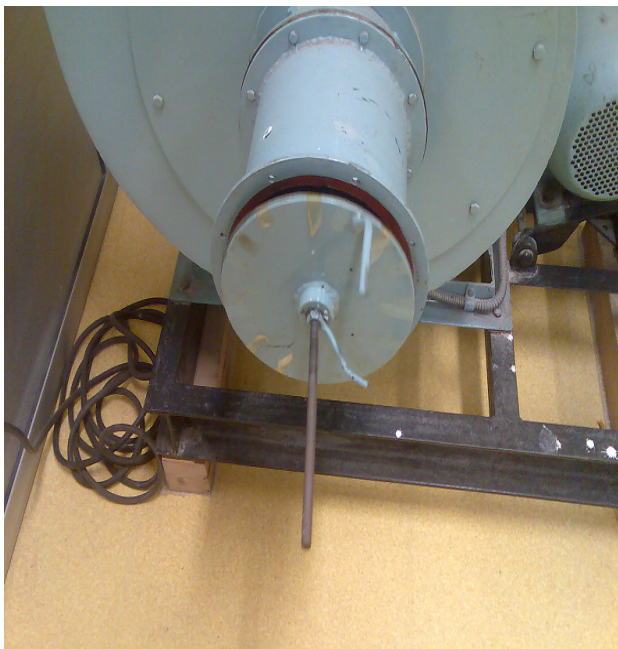
Postupak mjerenja smo izveli dva puta radi uspoređivanja rezultata tj. ponovili smo postupak na istim mjernim točkama. Uzeli smo 7 različitih položaja otvorenosti usisa na kojima smo mjerili pad tlaka na prigušnici pomoću mikromanometra na kojem se očitavao iznos otklona u koso položenoj cijevi l [mm] i pomoću diferencijalnog pretvornika tlaka na kojem se očitavao iznos struje u [mA], a koju je moguće mjeriti u rasponu od 4 do 20 [mA], što je ekvivalentno iznosima tlaka od 0 do 10 [mbar].

Cilj mjerenja je pomoću izmjerene razlike tlaka izračunati brzinu strujanja zraka u cijevi te konačno proračunati volumni protok. To je učinjeno zato da bi se konačni rezultati brzina mogli uspoređivati, a ujedno i provjeriti. Krilnim anemometrom također je mjerena brzina strujanja zraka u cijevi i podatak o toj brzini također je relevantan za konačnu usporedbu i obradu rezultata.

Tokom svakog pojedinog mjerenja bilježe se podaci i o okolišnoj temperaturi kao i o temperaturi zraka koji struji u cijevi. Također se bilježi i tlak okoliša pomoću aneroidnog barometra. Cijeli postupak se ponavlja za svaku mjernu točku.

Kad je završeno mjerenje za jedan maseni protok, na ventilatoru je podešen novi veći maseni protok zraka i mjerenje se ponovilo.





Slika 12.: Usisni dio ventilatora

3.4. Proračun protoka zraka u cjevovodu

3.4.1. Proračun pomoću mikromamometra

- a) Diferencijalni tlak određena pomoću mikromanometra:

$$\Delta p_{\text{mikro}} = k \cdot \rho_{\text{Al}} \cdot g \cdot l \quad (12)$$

gdje je:

Δp_{mikro} – diferencijalni tlak ispred i iza prigušnice mjeren pomoću mikromanometra [Pa]

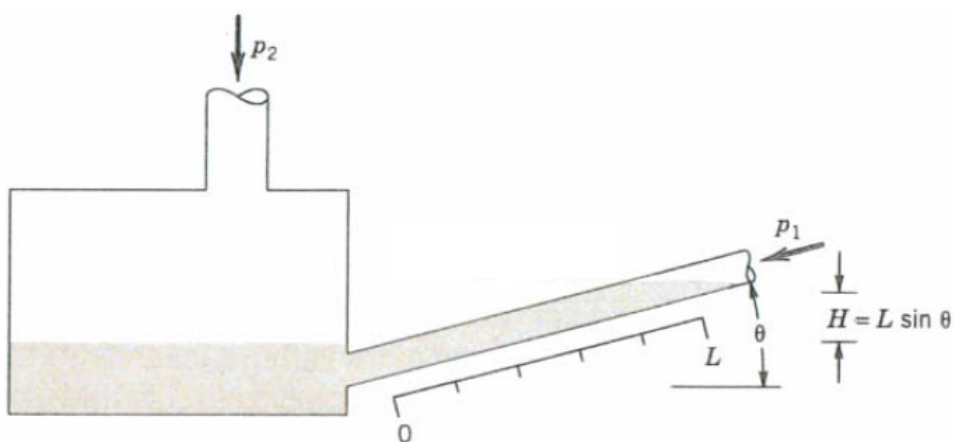
k - prijenosni omjer (nagib kose cijevi mikromanometra)

ρ_{Al} - gustoca 96%-tnog alkohola [kg/m³]

g - gravitacijska konstanta [m/s²]

l - odklon mjerne tekucine (alkohol) [m]

Gustoca 96%-tnog alkohola koji se nalazi u mikromanometru određena je za temperaturu okolišnog zraka.



Slika 13.: Mikromanometar

b) Procjena mjerne nesigurnosti kod mjerenja mikromanometrom

Načini određivanja mjerne vrijednosti mogu se podijeliti u dvije osnovne skupine:

- nesigurnost tipa A (u_A): određuje se na temelju razdiobe učestalosti (frekvencija) pojedinih očitavanja dobivenih ponavljanjem mjerenja.

Mjerna nesigurnost tipa-A

$$x_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad x_i \text{-svaka pojedino očitana vrijednost u } n \text{ očitavanja} \quad (13)$$

devijacija za svako očitavanje je definirana kao:

$$d_i = x_i - x_m \quad (14)$$

Standardna devijacija definirana je izrazom

$$s = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2 \right]^{1/2} = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2 \right]^{1/2} \quad (15)$$

$$u_A(x_i) = s$$

- nesigurnost tipa B (u_B): uobičajeno se procjenjuje na temelju pretpostavljene razdiobe učestalosti. Apsolutna nesigurnost rezultata mjerenja $u(y)$ aproksimira se tada izrazom koji predstavlja prvi član Taylorova reda:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial y}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)} \quad (16)$$

$$u_B(x) = u(y)$$

Ukupna nesigurnost definirana je kao ukupni geometrijski zbroj pojedinih komponenti prema sljedećem izrazu:

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (17)$$

b)4.2. Proračun pomoću diferencijalnog pretvornika tlaka

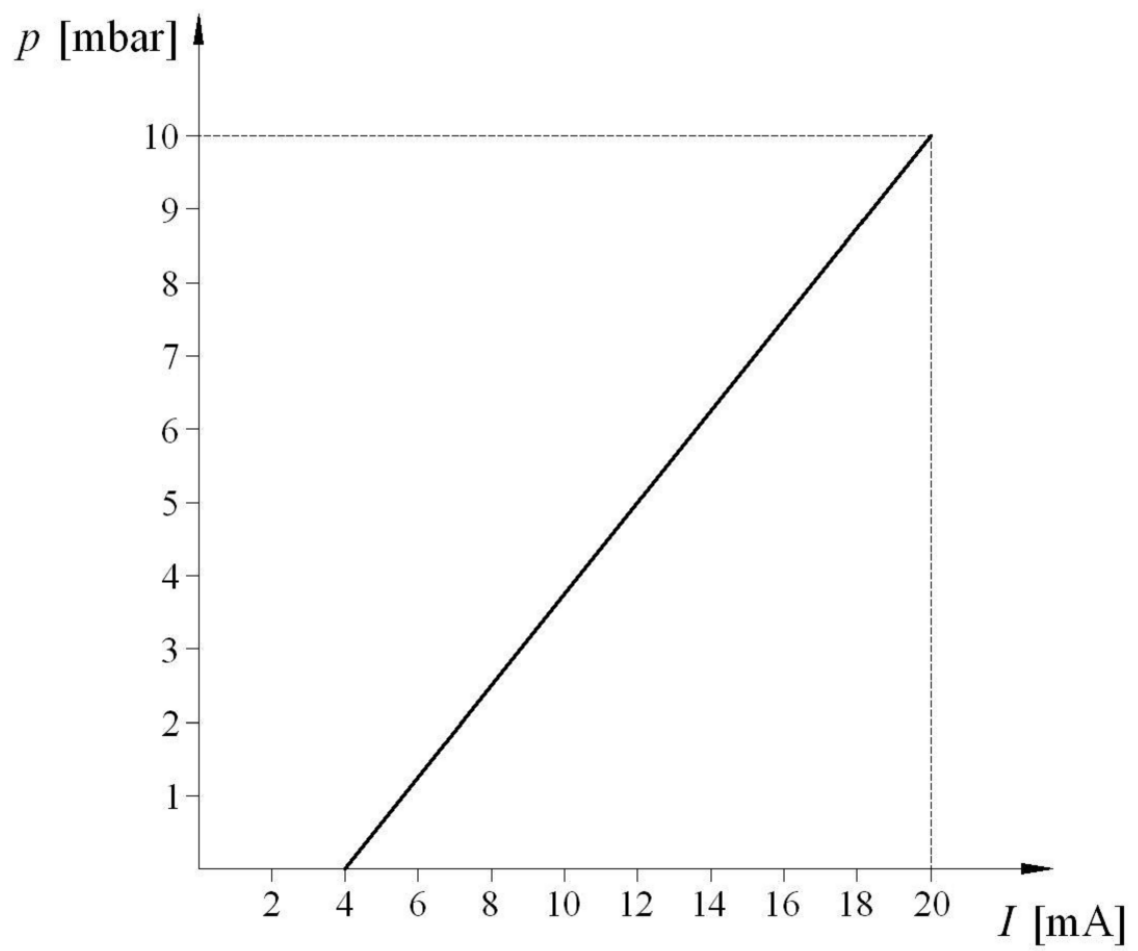
a) Ovisnost pada tlaka o jakosti struje:

$$\Delta p_{\text{dif}} = \frac{5}{8} \cdot I - \frac{10}{4} \quad (18)$$

Δp_{dif} – diferencijalni tlak ispred i iza prigušnice [mbar]

I - jakost struje [mA]

Ova jednažba prikazuje linearnu ovisnost pada tlaka Δp_{dif} o jakosti struje I i njen je oblik u biti eksplicitni oblik jednažbe pravca



Slika 14.: Ovisnost tlaka o jakosti struje kod mjerenja diferencijalnim pretvornikom tlaka

b) Procjena mjerne nesigurnosti kod mjerenja diferencijalnim pretvornikom tlaka

Procjena tipa-A ista kao kod mjerenja mikromanometrom, dok tip-B isčitavamo iz specifikacije:

0.2 % FS - FS označava mjereno područje 0 - 10 mbar u našem slučaju

$$0.2 \cdot 0.01 \cdot 10 = 0.02$$

Mjerna nesigurnost je tipa-B je 0.02 mbar.

$$u_B(x) = 0.02$$

Ukupna nesigurnost računa se isto kao kod mikromanometra.

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (17)$$

a).5. Gustoća zraka koji struji u cijevi:

$$\rho_z = \frac{p}{R \cdot T}$$

(18)

ρ_z - gustoća zraka u cijevi [kg/m³]

p - apsolutni statički tlak zraka [Pa]

R - specifična plinska konstanta zraka [J/kgK]

T - temperatura zraka u cijevi [K]

a).6. Brzina zraka koji struji kroz cijev:

Brzina izmjerena anemometrom jednaka je:

$$v_A = \frac{\Delta s}{\tau} \quad (19)$$

Δs - prijeđeni put zraka u zadanom vremenu (očitanje na 100 m)

τ - zadano vrijeme

a).7. Volumni protok zraka u cjevovodu:

$$q_v = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot w \quad (20)$$

q_v - volumni protok zraka [m³/s]

d - unutarnji promjer cjevovoda [m]

w - srednja brzina strujanja [m/s]

4. NORMA ISO5167-2:2003

4.1. Pregled jednadžbi kod mjerenja protočne količine pomoću oštre prigušnice prema ISO 5167-2 : 2003

Opći izraz za izračunavanje masenog protoka pomoću prigušnice glasi:

$$q_m = C \cdot E \cdot \varepsilon \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \quad (21)$$

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 [m²],
- ρ - gustoća fluida čiji se protok mjeri uzstrujno od mjerne prigušnice [kg /m³],
- Δp – razlika tlakova neposredno ispred i iza prigušnice
 $\Delta p = p_1 - p_2$ [Pa],

4.1.a Na temelju provedenih eksperimenata za oštre prigušnice kod kojih su priključci za mjerenje razlike tlakova izvedeni neposredno uz odgovarajuće plohe prigušnice (vidi Sliku 13), definirane normom ISO 5167-2 dobivena je zavisnost za koeficijent protjecanja C:

$$C = 0,5961 + 0,0261 \cdot \beta^2 - 0,216 \cdot \beta^8 + 0,000521 \left(\frac{10^6 \cdot \beta}{Re_D} \right)^{0,7} + (0,0188 + 0,0063 \cdot A) \cdot \beta^{3,5} \cdot \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0,3}$$

(22)

$$A = \left(\frac{19000 \cdot \beta}{Re_D} \right)^{0,8} \quad (23)$$

$$\beta = \frac{d}{D} \quad (24)$$

pri čemu β bezdimenzionalni odnos svijetlih otvora prigušnice odnosno cjevovoda u koji je prigušnica ugrađena. Oba promjera se uzimaju u pogonskom stanju pa je

$$d = d_0 [1 + \alpha_d (t - t_0)] \quad (25)$$

$$D = D_0 [1 + \alpha_D (t - t_0)] \quad (26)$$

d_0 i D_0 su promjeri svijetlih otvora prigušnice i cjevovoda izmjereni pri temperaturi okoline t_0 , α_d i α_D linearni koeficijenti temperaturnog istezanja za materijal prigušnice odnosno cjevovoda u m/mK a t , temperatura u pogonskom stanju.

Reynoldsova značajka strujanja u cjevovodu ispred prigušnice

$$Re = \frac{w_1 \cdot D}{\frac{\mu}{\rho_1}} \quad (1)$$

w_1 - srednja brzina strujanja fluida u cjevovodu ispred prigušnice [m/s],

D - promjer cjevovoda u pogonskom stanju [m],

μ – dinamički viskozitet [kg/sm],

4.1.b Faktor pristupne brzine E je bezdimenzionalna značajka koja obuhvaća povećanje brzine nastalo usljed suženja otvora prigušnice:

$$E = \frac{D^2}{\sqrt{D^4 - d^4}} = (1 - \beta^4)^{-\frac{1}{2}} \quad (27)$$

4.1.c Faktor ekspanzije ε je bezdimenzionalna značajka koja obuhvaća promjenu gustoće u slučaju protoka kompresibilnog fluida.

Empiriska jednadžba dobivena eksperimentalnim putem glasi:

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

(28)

pri čemu je p_1 statički tlak u cjevovodu ispred prigušnice, a κ eksponent izentropske ekspanzije. Za nekompresibilne fluide $\kappa = \infty$ te je $\varepsilon = 1$.

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

4.2.a Ograničenja u pogledu d , D i β :

$$d \geq 12,5 \text{ mm}$$

$$50 \leq D \leq 1000 \text{ mm}$$

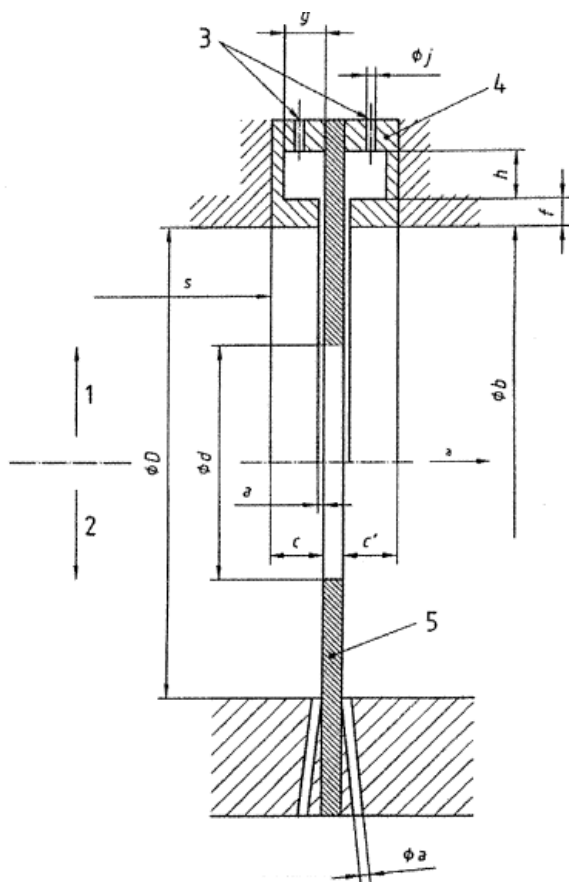
$$0,23 \leq \beta \leq 0,80$$

4.2.b Ograničenja u pogledu Re_D i β dana su u točki 5.3.1. norme.

4.2.c Ograničenja u pogledu hrapavosti dana su u točki 5.3.1. norme.

4.2.d Faktor ekspanzije ε može se izračunati pomoću gore navedene jednadžbe samo ako je $p_2 / p_1 \geq 0,75$

4.2.e Normom je u potpunosti definirana geometrija prigušnice, hrapavost obrade kao i način provjere ispunjenosti ovih uvjeta. Zahtjevi i ograničenja u pogledu ugradnje mjerne prigušnice su definirani 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.



- 1- izvedba sa ugradbenim prstenima, 2- izvedba sa pojedinačnim izvodima,
3-izvodi za tlak, 4-noseći prsten, 5-prigušnica

Slika 15.: Detalji oštre prigušnice

5.

REZULTATI MJERENJA I MJERNA NESIGURNOST

5.1. Rezultati mjerenja

Tablica 1.: Prvo mjerenje ulaznih vrijednosti na mjernoj liniji

Redni broj mjerenja	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
1. [mA]	8,06	7,98	7,93	7,65	6,91	5,2	4,53
2. [mA]	8,02	8,03	7,97	7,69	6,99	5,23	4,55
3. [mA]	8	8,04	7,92	7,74	7,01	5,021	4,59
4. [mA]	8,09	8,06	7,89	7,65	6,98	5,19	4,58
5. [mA]	8,13	8,05	7,89	7,73	7,03	5,24	4,5
I_{sr} [mA]	8,06	8,032	7,92	7,692	6,984	5,1762	4,55
τ [s]	8,26	8,25	8,33	8,64	9,66	15,12	21,9
w [m/s]	12,1 1	12,12	12,00	11,57	10,35	6,61	4,57
h [mm]	60	50	40	30	20	10	5
q_v [m ³ /s]	0,21	0,21	0,21	0,20	0,18	0,12	0,08
l [mm]	164, 0	163,0	158,0	149,0	120,0	51,0	24,0
t_v [°C]	23,2	23,4	23,8	23,7	23,7	23,8	23,8
t_u [°C]	20,2	20,5	20,7	20,7	20,7	20,9	20,9
$\Delta p_{mikromanometra}$ [Pa]	256, 5	254,9	247,1	233,0	187,7	79,8	37,5
$\Delta p_{diferencijalni pretvornik}$ [Pa]	253, 8	252,0	245,0	230,8	186,5	73,5	34,4

Tablica 2.: Dobiveni rezultati prvoga mjerenja

d [mm]	0,1255	0,1255	0,1255	0,1255	0,1255	0,1255	0,1255
D [mm]	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000
β [-]	0,6277	0,6277	0,6277	0,6277	0,6277	0,6277	0,6277
E [-]	1,0880	1,0880	1,0880	1,0880	1,0880	1,0880	1,0880
ε [-]	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Re [-]	2641510,3 7	2644709,4 0	2619315,5 8	2525332,8 3	2258682,7 8	1443045,8 0	996294,6 4
A [m ²]	0,0133	0,0133	0,0134	0,0138	0,0151	0,0216	0,0290
C [-]	0,6041	0,6041	0,6041	0,6042	0,6043	0,6048	0,6053
q_m [kg/s]	0,2000	0,2001	0,1973	0,1915	0,1722	0,1082	0,0740
k [-]	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000

Tablica 3.: Drugo mjerenje ulaznih vrijednosti na mjernoj liniji

Redni broj mjerenja	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
1. [mA]	8,03	7,98	7,91	7,68	7,14	5,5	4,48
2. [mA]	8,05	8,02	7,88	7,81	7,08	5,49	4,47
3. [mA]	8,06	8,05	7,9	7,76	7,18	5,53	4,45
4. [mA]	8,14	7,98	7,92	7,73	6,98	5,52	4,46
5. [mA]	8,03	8,09	7,88	7,71	7,05	5,46	4,49
Isr [mA]	8,06	8,024	7,9	7,738	7,086	5,5	4,47
τ [s]	8,2	8,3	8,35	8,59	9,57	13,98	23,6
w [m/s]	12,20	12,05	11,98	11,64	10,45	7,15	4,23
h [mm]	60	50	40	30	20	10	5
qv [m ³ /s]	0,22	0,21	0,21	0,21	0,18	0,13	0,07
l [mm]	164,0	162,0	158,0	150,0	125,0	63,0	21,0
t _v [°C]	23,6	23,7	23,8	23,9	23,9	23,9	24,0
t _u [°C]	20,5	20,8	20,8	20,8	20,9	20,8	20,8
$\Delta p_{\text{mikromanometra}}$ [Pa]	256,5	253,4	247,1	234,6	195,5	98,5	32,8
$\Delta p_{\text{diferencijalni pretvornik}}$ [Pa]	253,9	251,5	243,6	233,6	192,9	93,8	29,4

Tablica 4.: Dobiveni rezultati drugog mjerenja

d[mm]	0,1255	0,1255	0,1255	0,1255	0,1255	0,1255	0,1255
D[mm]	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000
β [-]	0,6277	0,6277	0,6277	0,6277	0,6277	0,6277	0,6277
E[-]	1,0880	1,0880	1,0880	1,0880	1,0880	1,0880	1,0880
ε [-]	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Re[-]	2660841,3	2628777,4	2613039	2540034,8	2279924,3	1560722,4	923747,8
A [m ²]	0,0132	0,0133	0,0134	0,0137	0,0150	0,0203	0,0308
C [-]	0,6041	0,6041	0,6041	0,6042	0,6043	0,6047	0,6054
q _m [kg/s]	0,2008	0,1999	0,1967	0,1927	0,1751	0,1222	0,0685
k[-]	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000

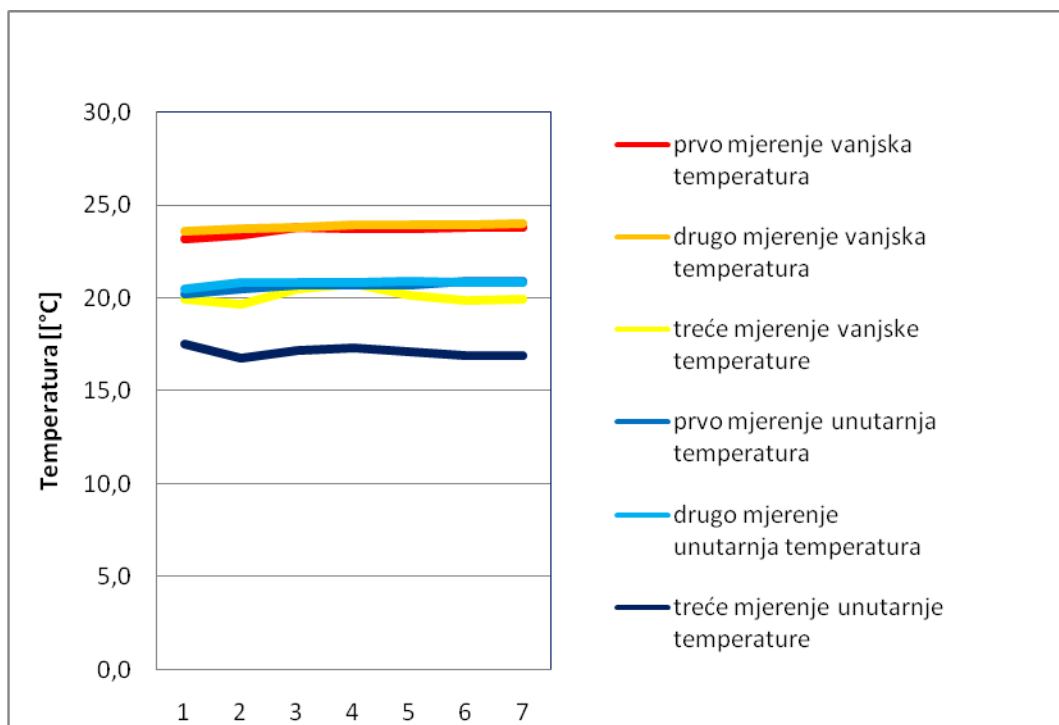
Tablica 5.: Treće mjerenje ulaznih vrijednosti na mjernoj liniji

Redni broj mjerenja	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
1. [mA]	8,03	7,98	7,91	7,68	7,14	5,5	4,48
2. [mA]	8,05	8,02	7,88	7,81	7,08	5,49	4,47
3. [mA]	8,06	8,05	7,9	7,76	7,18	5,53	4,45
4. [mA]	8,14	7,98	7,92	7,73	6,98	5,52	4,46
5. [mA]	8,03	8,09	7,88	7,71	7,05	5,46	4,49
I_{sr} [mA]	8,06	8,024	7,9	7,738	7,086	5,5	4,47
τ [s]	8,2	8,3	8,35	8,59	9,57	13,98	23,6
w [m/s]	12,20	12,05	11,98	11,64	10,45	7,15	4,23
h [mm]	60	50	40	30	20	10	5
q_v [m ³ /s]	0,22	0,21	0,21	0,21	0,18	0,13	0,07
l [mm]	164,0	162,0	158,0	150,0	125,0	63,0	21,0
t_v [°C]	23,6	23,7	23,8	23,9	23,9	23,9	24,0
t_u [°C]	20,5	20,8	20,8	20,8	20,9	20,8	20,8
1. [mm]	82	80	79	192	169	92	30
2. [mm]	81,0	80,5	78,5	191,0	168,0	92,5	29,5
3. [mm]	81	81	79	192	167,5	93	29,5
4. [mm]	81,5	81,5	78	191	168	93,5	29
5. [mm]	81,0	81,0	78,5	191,0	169,0	93,0	29,5
l_{sr} [mm]	81,3	80,8	78,6	191,4	168,3	92,8	29,5
Δp diferencijalni pretvornik [Pa]	264	260,8	253	244	213,5	112,38	31,8
p_1 [Pa]	318	315,9	307	299,3	263,2	145,13	46,9
$p_2 = p_1 - \Delta p$ [Pa]	54,2	55,16	54,7	55,33	49,71	32,756	15,2

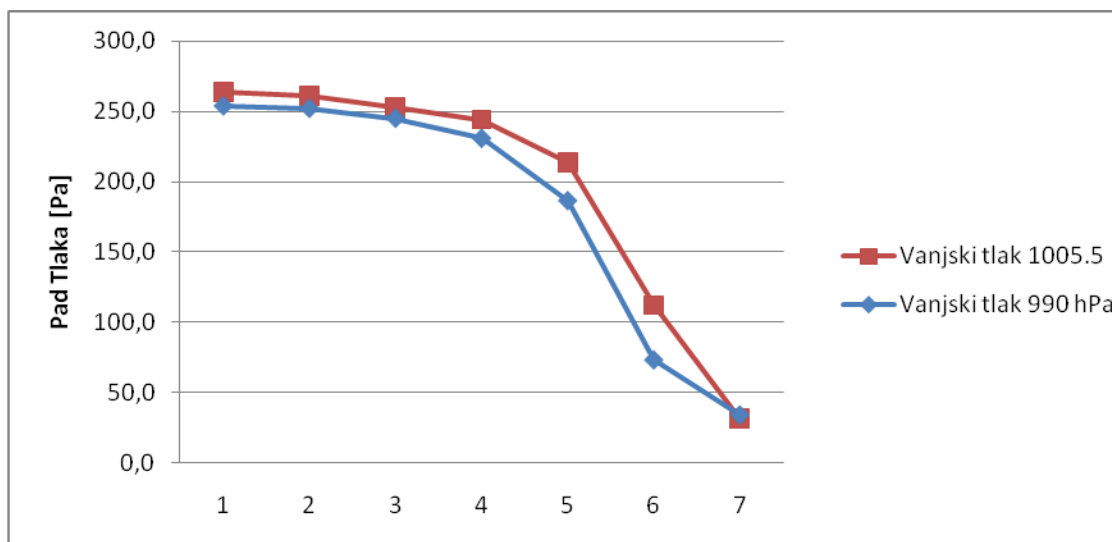
Tablica 6.: Dobiveni rezultati trećeg mjerenja

d [mm]	0,1255	0,1255	0,1255	0,1255	0,1255	0,1255	0,1255
D [mm]	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000
β [-]	0,6277	0,6277	0,6277	0,6277	0,6277	0,6277	0,6277
E [-]	1,0880	1,0880	1,0880	1,0880	1,0880	1,0880	1,0880
ε [-]	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
Re [-]	2563760,7	2654198,4	2622285,9	2594217,9	2371463,6	1748196,2	940813,5
A [m ²]	0,0136	0,0132	0,0134	0,0135	0,0145	0,0185	0,0304
C [-]	0,6042	0,6041	0,6041	0,6042	0,6042	0,6046	0,6054
q_m [kg/s]	0,2046	0,2035	0,2003	0,1969	0,1842	0,1337	0,0712
k [-]	0,5000	0,5000	0,5000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000

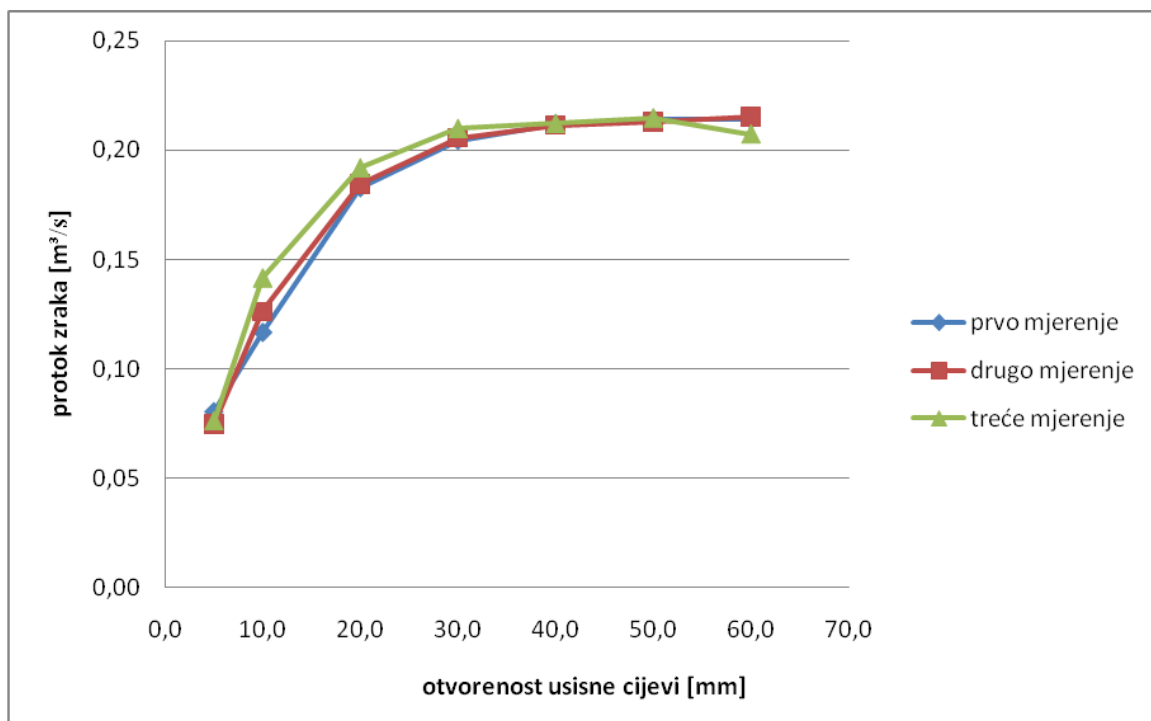
5.2. Mjerna nesigurnost



Dijagram 1.: Promjene unutarnje i vanjske temperature prilikom mjerenja



Dijagram 2.: Ovisnost pada tlaka na prigušnici o vanjskom tlaku

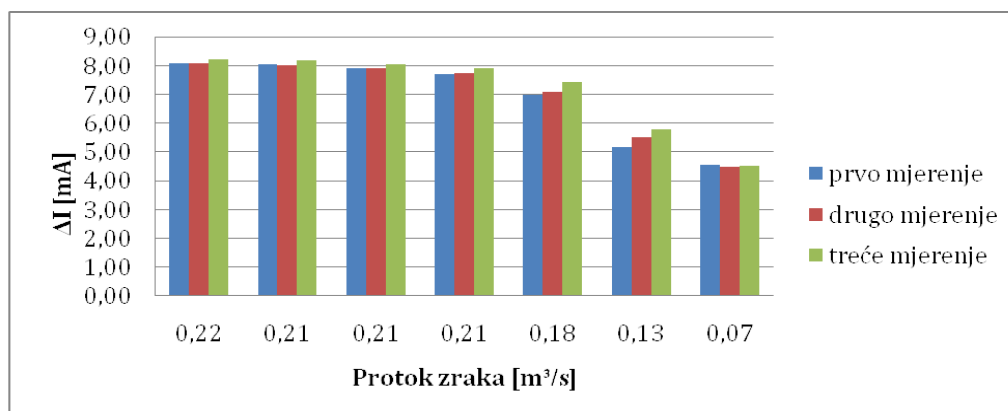


Dijagram 3.: Ovisnost protoka zraka o otvoru za usis zraka

Tablica 7.: Mjerna nesigurnost kod mjerenja diferencijalnim pretvornikom tlaka

Diferencijalni pretvornik							
Mjerenje	1	2	3	4	5	6	7
1	8,03	7,98	7,91	7,68	7,14	5,5	4,48
2	8,05	8,02	7,88	7,81	7,08	5,49	4,47
3	8,06	8,05	7,9	7,76	7,18	5,53	4,45
4	8,14	7,98	7,92	7,73	6,98	5,52	4,46
5	8,03	8,09	7,88	7,71	7,05	5,46	4,49
Isr [mA]	8,062	8,024	7,898	7,738	7,086	5,5	4,47
s[standardna devijacija]	0,0455	0,0472	0,0179	0,0497	0,0780	0,0274	0,0158
tipB[mA]	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200

ukupna[mA]	0,0497	0,0513	0,0268	0,0536	0,0805	0,0339	0,0255
Prosirena nesig.[mA]	0,0994	0,1026	0,0537	0,1071	0,1610	0,0678	0,0510
s[Pa]	2,8436	2,9514	1,1180	3,1062	4,8734	1,7116	0,9882
tipB[Pa]	1,2500	1,2500	1,2500	1,2500	1,2500	1,2500	1,2500
ukupna [Pa]	3,1062	3,2052	1,6771	3,3483	5,0312	2,1195	1,5934
Prosječno odstupanje pri mjerenju diferencijalnim pretvornikom [Pa]							2,8687



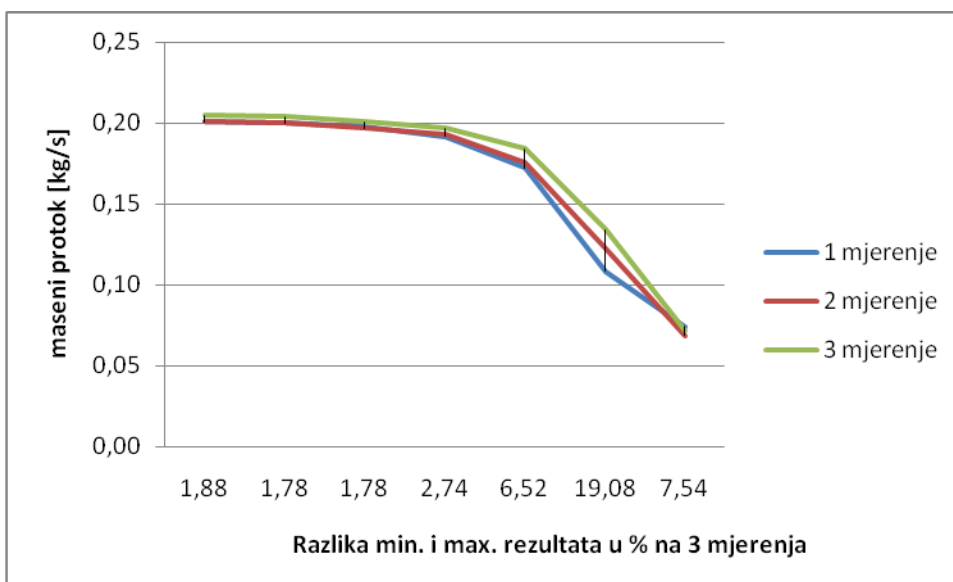
Dijagram 4.: Razlike u očitavanju struje pri sva tri mjerenja

Tablica 8.: Mjerena nesigurnost kod mjerenja mikromanometrom

Mikromanometru							
Mjerenje	1	2	3	4	5	6	7
1	82	80	79	192	169	92	30
2	81	80,5	78,5	191	168	92,5	29,5
3	81	81	79	192	167,5	93	29,5
4	81,5	81,5	78	191	168	93,5	29
5	81	81	78,5	191	169	93	29,5
hsr[mm]	81,3	80,8	78,6	191,4	168,3	92,8	29,5
s[mm]	0,4472	0,5701	0,4183	0,5477	0,6708	0,5701	0,3536
s[Pa]	1,7479	2,2282	1,6350	0,8563	1,0487	0,8913	0,5527
tipB[Pa]	4,5131	4,5131	4,5131	4,5131	4,5131	4,5131	4,5131
ukupna[Pa]	4,8397	5,0331	4,8001	4,5936	4,6333	4,6002	4,5468
Prosirena nesig.	9,6795	10,0663	9,6002	9,1872	9,2667	9,2005	9,0936
Prosječno odstupanje pri mjerenju mikromanometrom [Pa]							4,7210

Tablica 9.: Razlike u izračunu protoka nakon svakog mjerenja

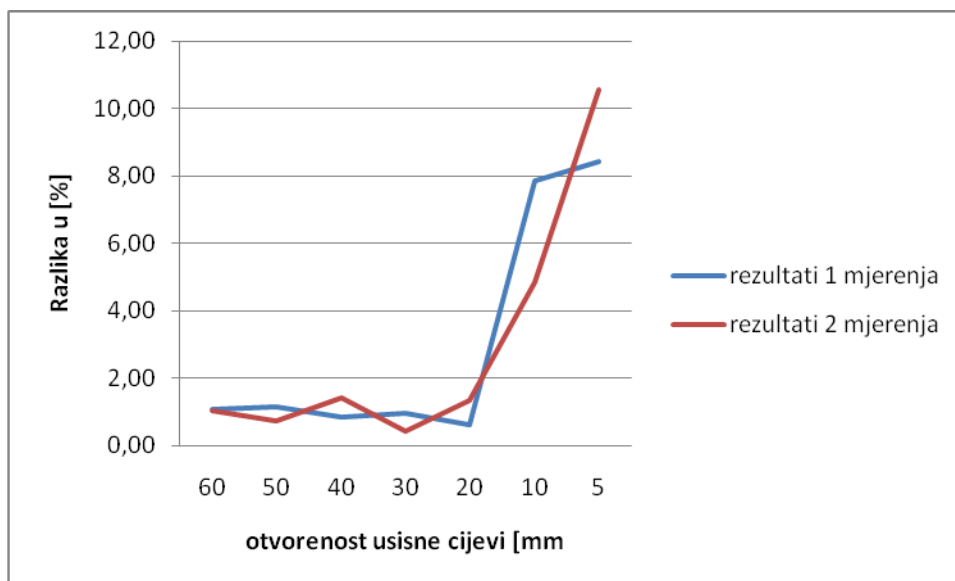
razlika protoka na mjerjenjima	1	2	3	4	5	6	7
1 mjerenje [kg/s]	0,214	0,214	0,212035	0,204	0,183	0,1168	0,0807
2 mjerenje [kg/s]	0,215	0,213	0,211527	0,206	0,185	0,1263	0,0748
3 mjerenje [kg/s]	0,208	0,215	0,21229	0,21	0,192	0,1415	0,0762
Razlika [%]	3,643	0,964	0,359281	2,662	4,762	17,46	7,282



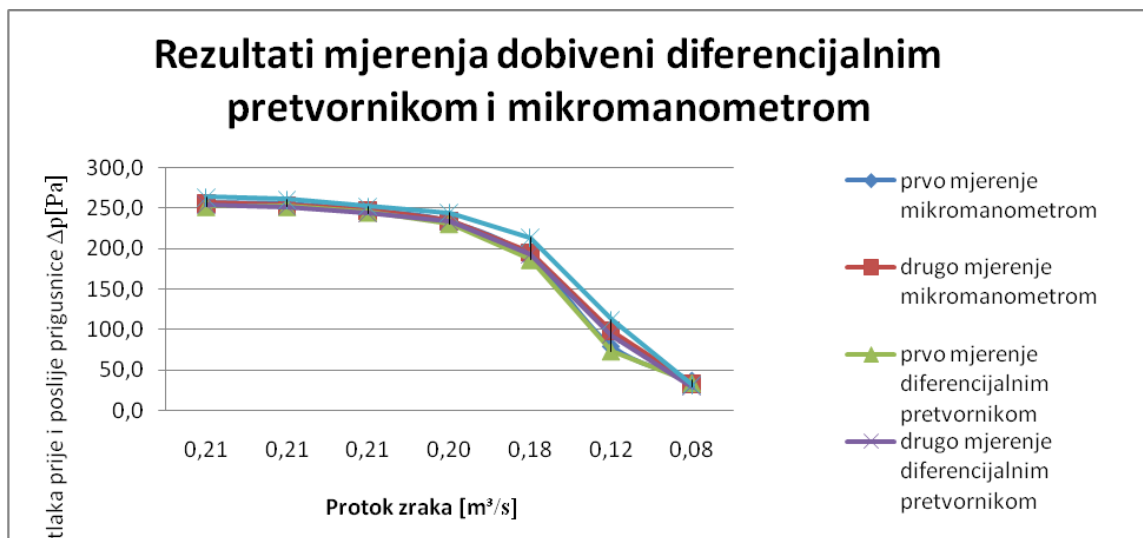
Dijagram 5.: Razlike u izračunu protoka

Tablica 10.: Razlike u očitavanju mjerenja diferencijalnog pretvornika i mikromanometra

razlika Δp_{mik} i Δp_{dp} [%]	1	2	3	4	5	6	7
1 mjerenje [%]	1,06	1,14	0,85	0,98	0,62	7,83	8,42
2 mjerenje [%]	1,02	0,73	1,41	0,41	1,34	4,85	10,56



Dijagram 6.: Razlike u očitanju mjerenja diferencijalnog pretvornika i mikromanometra



Dijagram 7.: Ovisnost pada tlaka o protoku zraka

6.

ZAKLJUČAK

U radu je razrađen postupak mjerenja protoka mjernom prigušnicom. Prikazana je mjerna linija za mjerenje sa oštrom prigušnicom, postupci mjerenja, proračun brzina strujanja protočnih količina te primjer sa rezultatima.

Mjerenja pokazuju neka odstupanja u odnosu na neki relevantni faktor, u ovom radu to je krilni anemometar iako on ne predstavlja etalon već služi samo kako bi dao neke orijentacijske vrijednosti brzine strujanja. Ako se analiziraju rezultati srednjih vrijednosti pada tlaka i protoka, generalni zaključak je da je malo preciznije mjeriti s diferencijalnim pretvornikom tlaka u odnosu na mikromanometar iz razloga što je usisni dio mjerne linije neprikladan za finija mjerenja. Mjerna nesigurnost kod manometra je otprilike 4,7Pa (tablica 8.) što je za otprilike 61% više nego kod diferencijalnog pretvornika tlaka 2,9 Pa (tablica 7.). Pri smanjenju otvora za dovod zraka povećava se razlika u dobivenim rezultatima diferencijalnog pretvornika i mikromanometra (dijagram 6.). Nadalje, prikladna skala na otvoru usisne cijevi (ulazna strana ventilator slika 12.) je od 0 do 40 mm pošto rezultati (dijagram 3.) jasno pokazuju da nakon 35 mm vrijednosti promjene volumenskog protoka zraka pada ispod 5% tj. zadržava se na vrijednosti oko 0,21 [m³/s]. Prosječne razlike rezultata mjerenja volumenskog protoka na anemometru su do 5,3 %, dok na oštroj prigušnici mjerenje protočne mase su do 5,9 %. Na temelju ovih rezultata možemo zaključiti da mjerenje oštrom prigušnicom na ovoj mjernoj liniji je adekvatno za školske primjere mjerenja no ne i za ozbiljnija mjerenja padova tlaka.

7. POPIS LITERATURE

- [1] Virag Z., *Mehanika fluida: Odabrana poglavlja, primjeri i zadaci*, FSB, Zagreb, 2002.
- [2] Ripka P., Tipek A., *Modern sensors handbook*, ISTE Ltd., London, 2007.
- [3] Feuerbach V., *Mjerenje protoka metodom brzine*, FSB (Laboratorij za procesna mjerenja), Zagreb, 1982.
- [4] Kothandaraman C.P., Rudramoorthy R., *Fluid mechanics and machinery*, New Age International (P) Ltd., Publishers, New Delhi, 2007.
- [5] Durst F., *Fluid mechanics: An introduction to the theory of fluid flows*, Springer, Berlin, 2008.
- [6] International standard, ISO 4006:1991 (E/F), *Measurement of fluid flow in closed conduits - Vocabulary and symbols*
- [7] International standard, ISO 5167-1 (E/F), *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full- Part 1: General principles and requirements*
- [8] 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*