

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:483375>

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

*Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-17***

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 mjerena protocnih kolicina mjernom prigušnicom u cijevi okruglog presjeka. U tu svrhu korištena je postojeća mjerna oprema Laboratorija za procesna mjerena Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Kod mjerena 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 mjerena. U svrhu što bolje usporedbe rezultata, korišteno je više različitih mjernih instrumenata, primjerice mikromanometar i diferencijalni pretvornik tlaka za određivanje dinamickog tlaka zraka u cijevi. U radu su tablicno prikazana sva mjerena, dijagrami kao i proračun protoka.

SADRŽAJ

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

Popis slika

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

Popis tablica

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

Popis dijagrama

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

Popis oznaka

Latinične oznake

Oznaka	Jedinica	
A	m^2	površina
C	-	koeficijent protjecanja
C_c	-	koeficijent korekcije mlaza
C_d	-	koeficijent korekcije protoka
C_v	-	koeficijent korekcije brzine

<i>D</i>	m	vanjski promjer cijevi
<i>d</i>	m	unutrašnji promjer cijevi
<i>E</i>	-	koeficijent pristupne brzine
<i>g</i>	m/s^2	gravitacijska konstanta
<i>h</i>	m	otvorenost cilindra
<i>I</i>	A	jakost struje
<i>I</i>	A	srednja jakost struje
<i>k</i>	-	Nagib mikromanometra
<i>l</i>	m	otklon tekućine u mikromanometru
<i>lsr</i>	m	srednji otklon tekućine u mikromanometru
<i>p</i>	Pa	tlak
<i>po</i>	Pa	okolišni tlak
<i>pd</i>	Pa	dinamički tlak
<i>ps</i>	Pa	statički tlak
<i>pt</i>	Pa	totalni (ukupni) tlak
<i>qm</i>	kg/s	maseni protok
<i>qv</i>	m^3/s	volumni protok
<i>Qid</i>	m^3/s	idealni protok
<i>Qs</i>	m^3/s	stvarni protok
<i>R</i>	$\text{J}/(\text{kgK})$	Specifična plinska konstanta
<i>Re</i>	-	Reynoldsova značajka
<i>tv</i>	$^{\circ}\text{C}$	Vanjska temperatura
<i>tu</i>	$^{\circ}\text{C}$	Unutarnja temperatura
<i>T</i>	K	termodinamička (apsolutna) temperatura
<i>w</i>	m/s	brzina

Grčke oznake

Oznaka	Jedinica	
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 potrebano za put od 100 m

1.

UVOD

Napori za kontrirano mjerjenje 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 mjerjenje 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 započinju njihovu upotrebu zbog niske cijene i lakog održavanja.

1.1. *Podjela metoda mjerjenja 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

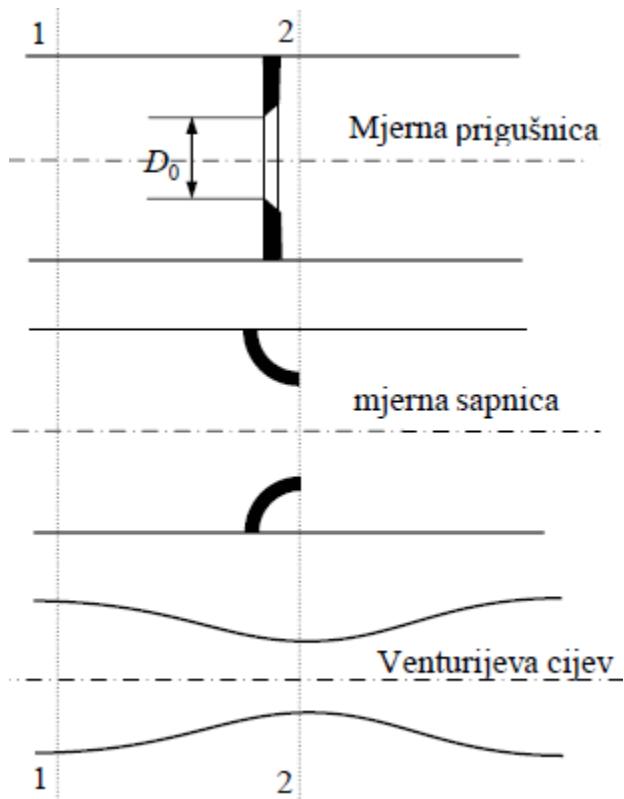
4. Tehnike vizualizacije protoka

2. TEORIJSKE OSNOVE METODA MJERENJA PROTOKA TEMELJENE NA RAZLICI TLAKOVA

Uređaji za mjerjenje 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:

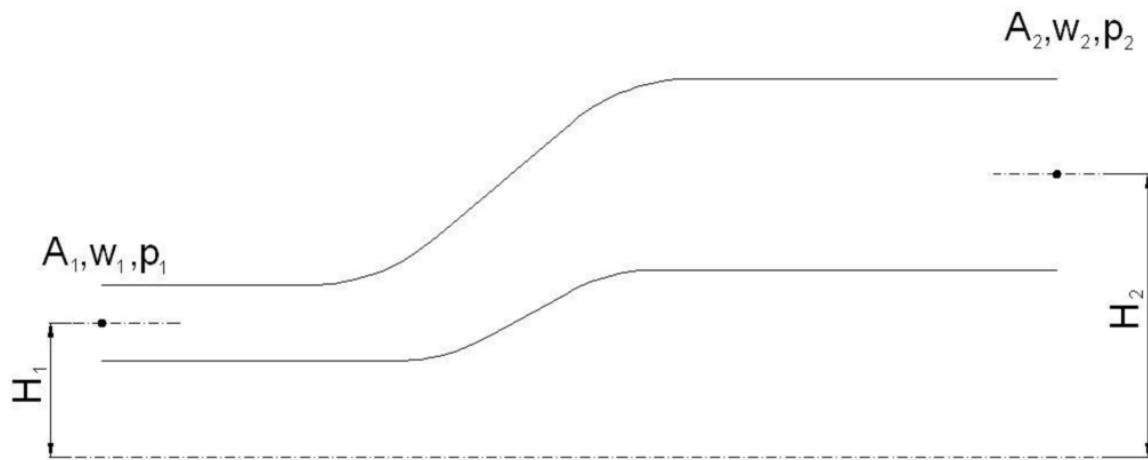
- mjerna prigušnica
- mjerna sapnica
- Venturijeva cijev



Slika 1.: Mjerni uređaj

2.1. Bernulijeva jednadžba

Mnoge metode mjerena 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:

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

Zbroj $p + \rho \cdot g \cdot H$ 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]

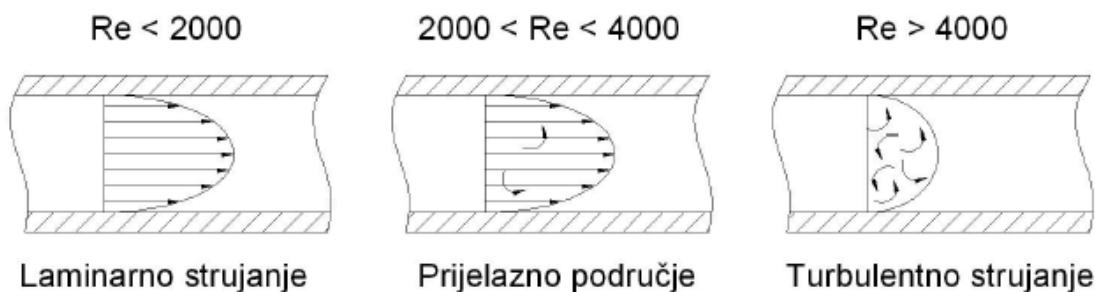
\nu - kinematička viskoznost [m²/s]

\rho - gustoća fluida [kg/m³]

\mu - 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**

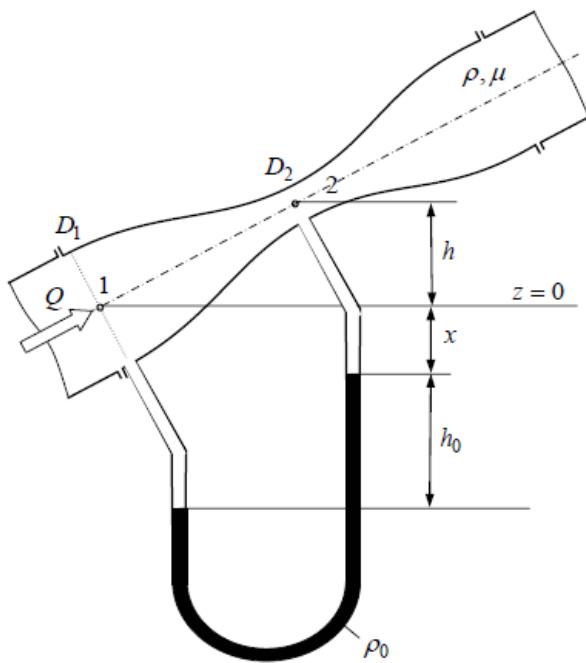
Venturijeva cijev kao na slici 4 služi za mjerjenje protoka. Sastoji se od ulaznog dijela s ugradenim piezometričkim prstenom, konvergentnog dijela, nazužeg dijela (grla cijevi), također s piezometričkim prstenom, i blago divergentnog dijela. Ulazni dio i izlaz divergentnog dijela imaju jednak promjer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

Izraz za idealni protok:

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

dok je stvarni protok:

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



Slika 4.: Venturijeva cijev

Kod dobro izrađene Venturijeve cijevi

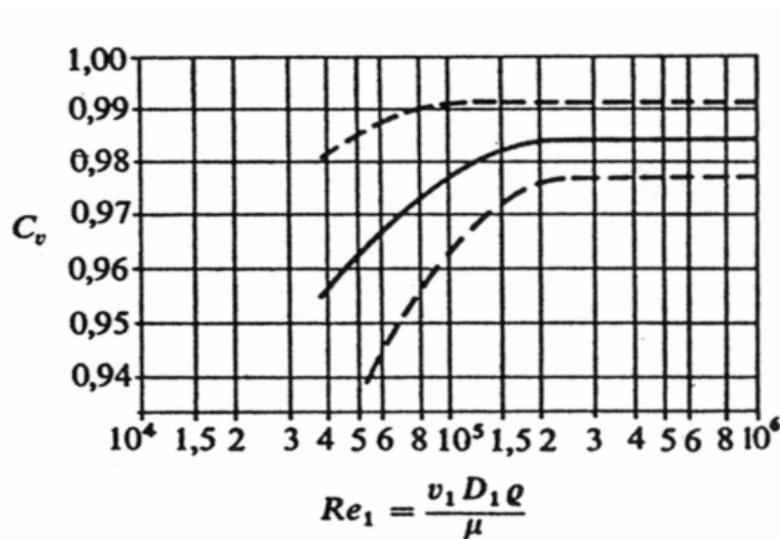
$$C_c = 1. \text{ Za } Re > 2 \cdot 10^5 \quad C_v \sim 0,984.$$

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 mernom sapnicom**

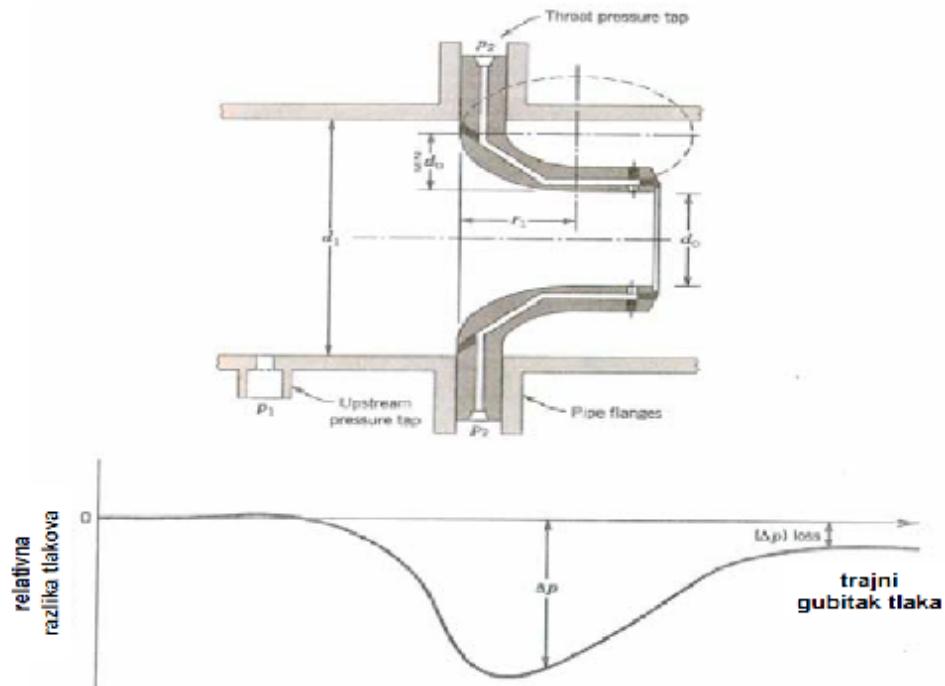
Mjerna sapnica (Slika 6) radi na istom principu kao i Venturijeva cijev, samo mlaz iza grla nijevođen, već slobodno ulazi u cijev cjevovoda, što uzrokuje veće gubitka tlaka.

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

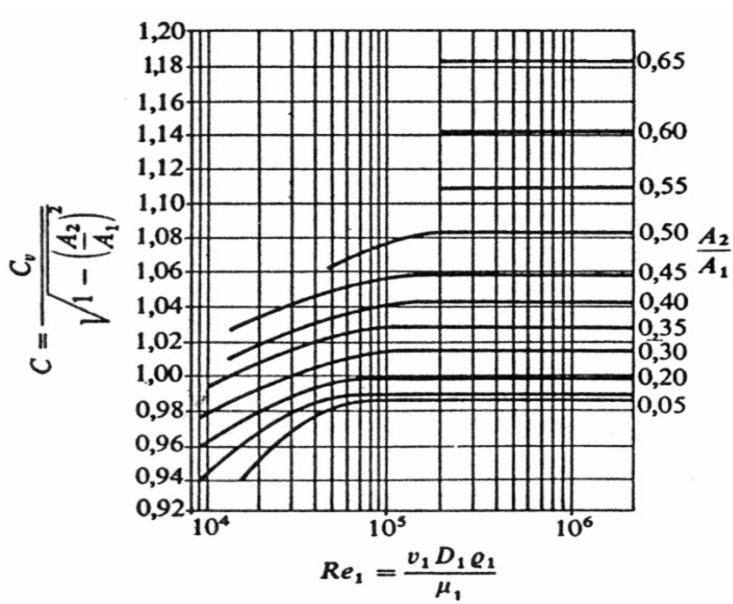
$$C = \frac{C_v}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \quad (7)$$



Slika 6.: Mjerna sapnica

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

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



Slika 7.: Dijagram koeficijenata protoka C mjerne sapnice u ovisnosti o Reynoldsovombroju 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

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

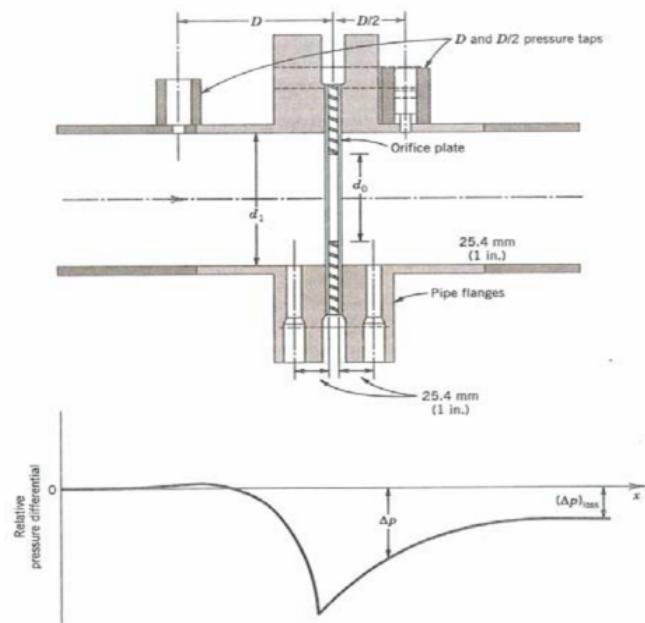
gdje je koeficijent protoka

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

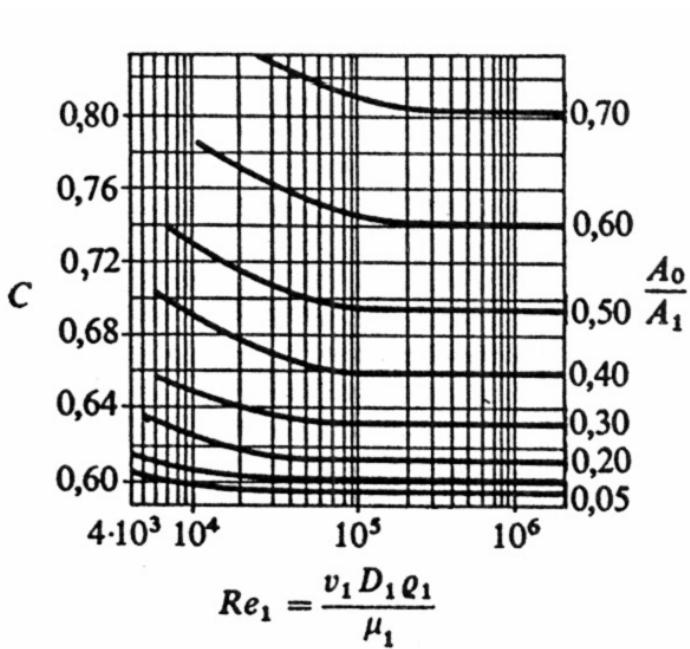
Kako bi se izbjeglo određivanje dvaju koeficijenata C_c i C_v , primjenjuje se jednostavnija formula:

$$Q = CA_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)} \quad (11)$$

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



Slika 8.: Mjerna prigušnica

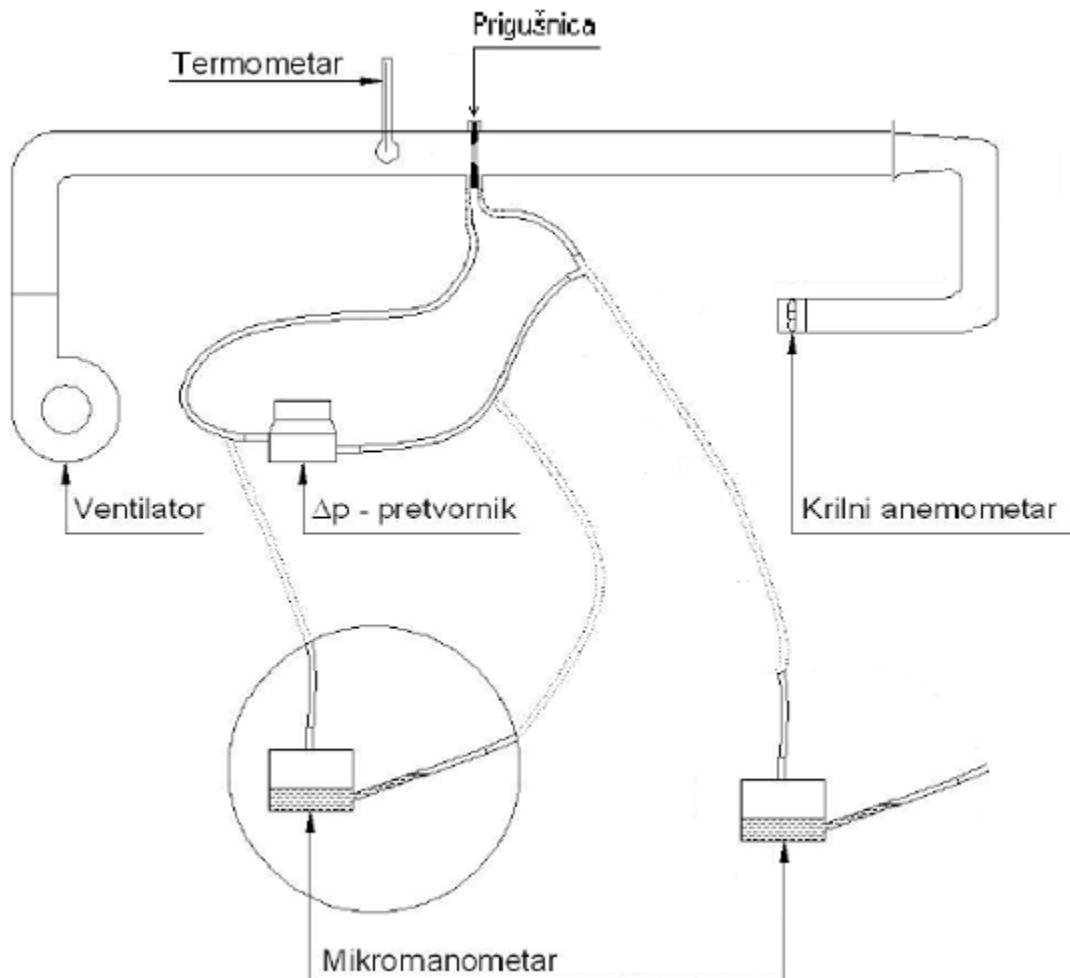


Slika 9.: Dijagram koeficijenata C mjerne dijafragme ovisnosti o Reynoldsovom broju Re_1 i omjeru A_0/A_1

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 mjeru liniju sa svom pripadajućom opremom i instrumentima potrebnim za mjerjenje protoka. Za mjerjenje pada tlaka odabrali smo diferencijalni

prevornik tlaka i mikromanometar.



Slika 11.: Slika mjerne linije

3.2. Specifikacije uređaja korištenih tijekom mjerjenjima

1. MIKROMANOMETAR

Proizvodac: "Zaklady Cynkove", 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

Punjjenje: 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 mjerena*

Prije početka mjerena 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 mjerena i prikaza rezultata. Sljedeće sto smo morali napraviti bilo je doljevanje alkohola u mjerni instrument zvan mikromanometar te postaviti mjernu skalu u odgovarajući položaj za mjerenu.

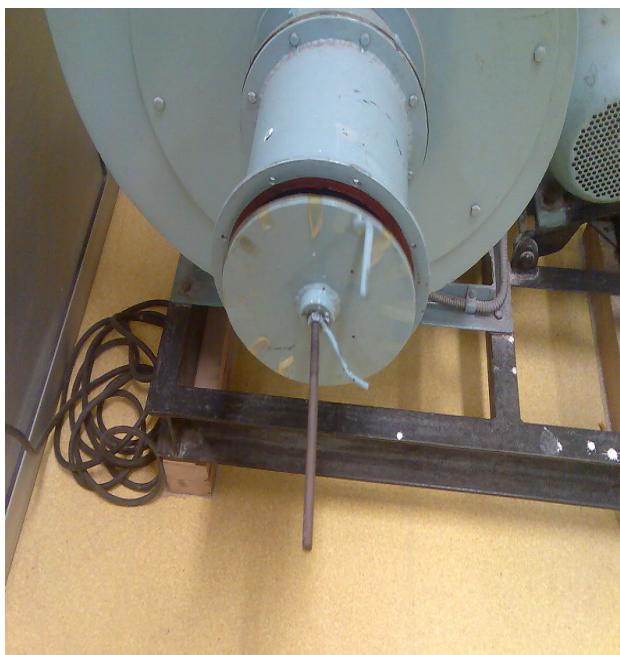
Postupak mjerena smo izveli dva puta radi uspoređivanja rezultata tj. ponovili smo postupak na istim mjernim točkama. Uzeli smo 7 različitih položaja otvorenosti usisa na kojima smo mjerili pad tlaka na prigušnici pomoću mikromanometra na kojem se ocitavao iznos otklona u koso položenoj cijevi l [mm]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

Cilj mjerena je pomocu izmjerene razlike tlaka izracunati brzinu strujanja zraka u cijevi te konacno proracunati volumni protok. To je učinjeno zato da bi se konacni rezultati brzina mogli usporedivati, a ujedno i provjeriti. Krilnim anemometrom također je mjerena brzina strujanja zraka u cijevi i podatak o toj brzini također je relevantan za konacnu usporedbu i obradu rezultata.

Tokom svakog pojedinog mjerjenja bilježe se podaci i o okolišnoj temperaturi kao i o temperaturi zraka koji struji u cijevi. Takoder se bilježi i tlak okoliša pomocu aneroidnog barometra. Cijeli postupak se ponavlja za svaku mjerenu točku.

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





Slika 12.: Usisni dio ventilatora

3.4. Proračun protoka zraka u cjevovodu

3.4.1. Proračun pomoću mikromanometra

a) Diferencijalni tlak odredena pomoću mikromanometra:

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

gdje je:

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

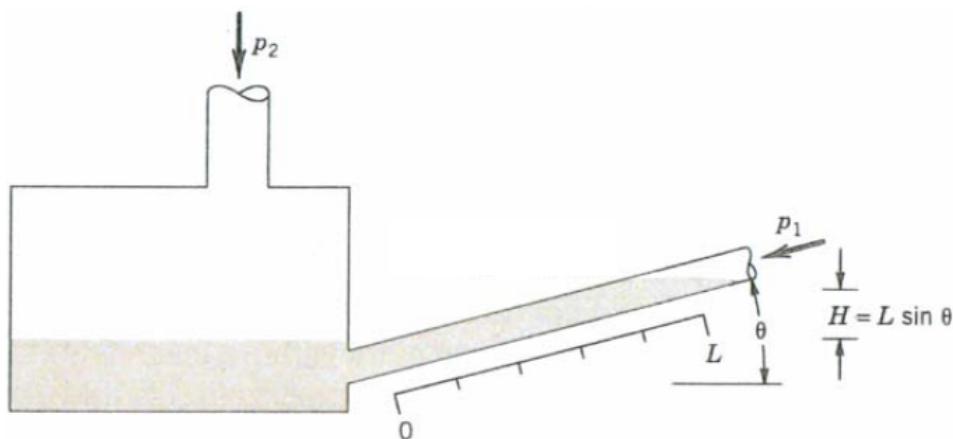
k - prijenosni omjer (nagib kose cijevi mikromanometra)

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

g - gravitacijska konstanta [m/s²]

l - otklon mjerne tekućine (alkohol) [m]

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



Slika 13.: Mikromanometar

b) Procjena mjerne nesigurnosti kod mjerjenja 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 očitanja dobivenih ponavljanjem mjerjenja.

Mjerna nesigurnost tipa-A

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

devijacija za svako očitanje je definirana kao:

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

Standardna devijacija definirana je izrazom

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

$$(15) \quad u_A(x_i) = s$$

- nesigurnost tipa B (u_B): uobičajeno se procjenjuje na temelju pretpostavljene razdiobe učestalosti. Apsolutna nesigurnost rezultata mjerena $u(y)$ 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

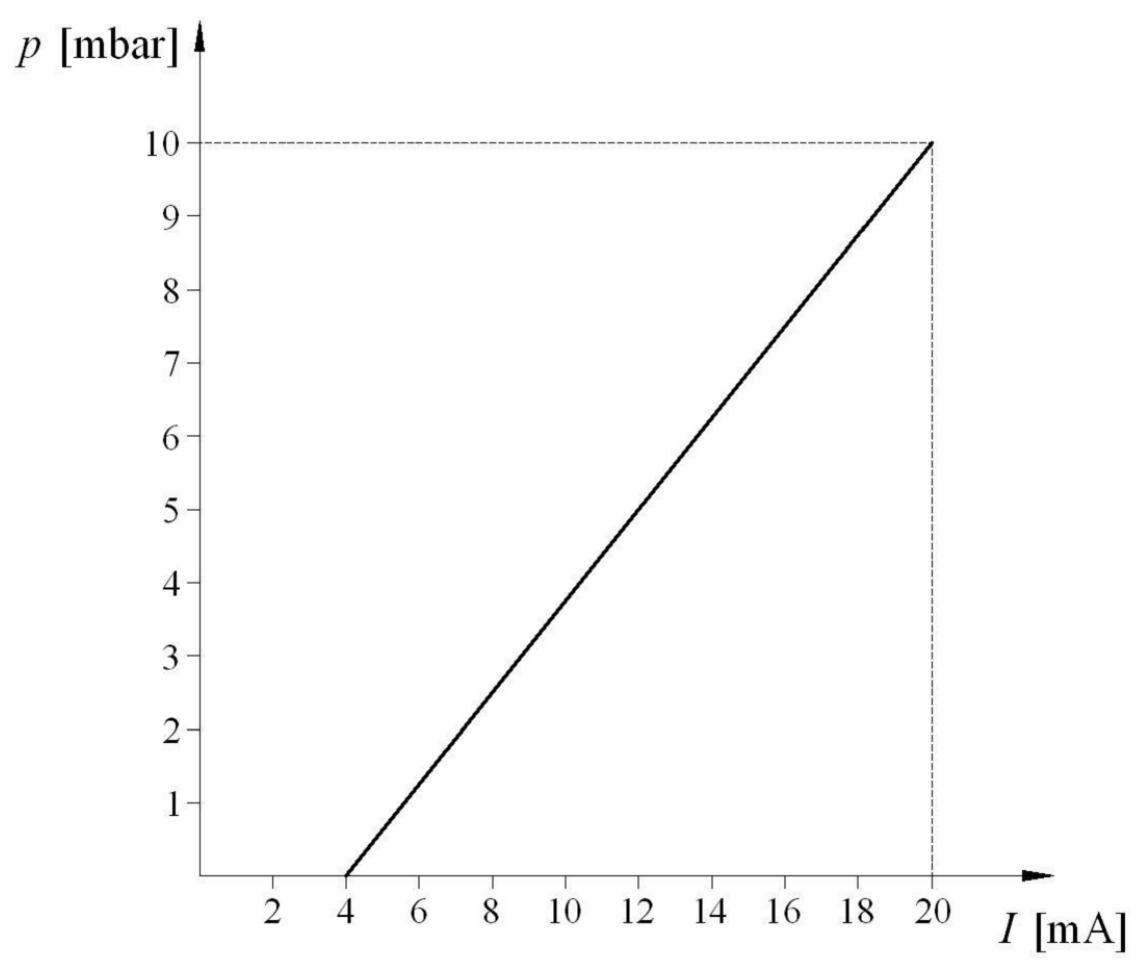
a) Ovisnost pada tlaka o jakosti struje:

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

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

I - jakost struje [mA]

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



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

- b) Procjena mjerne nesigurnosti kod mjerjenja diferencijalnim pretvornikom tlaka

Procjena tipa-A ista kao kod mjerjenja 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. Gustoca zraka koji struji u cijevi:

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

(18)

ρ_z - gustoca zraka u cijevi [kg/m³]

p - apsolutni staticki tlak zraka [Pa]

R - specificna plinska konstanta zraka [J/kgK]

T - temperatura zraka u cijevi [K]

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

Brzina izmjerena anemometrom jednaka je:

$$v_A = \frac{\Delta s}{\tau}$$

(19)

Δs - prijeđeni put zraka u zadanim vremenima (očitavano vrijeme na 100 m)

τ - zadano vrijeme

a).7. Volumni protok zraka u cjevovodu:

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

q_v - volumni protok zraka [m^3/s]

d - unutarnji promjer cjevovoda [m]

w - srednja brzina strujanja [m/s]

4. NORMA ISO5167-2:2003

4.1. Pregled jednadžbi kod mjerjenja protočne količine pomoću oštре 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 svjetlog 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],

4.1.a Na temelju provedenih eksperimenata za oštре prigušnice kod kojih su priključci za mjerjenje 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 svjetlih otvora prigušnice i cjevovoda izmjereni pri temperature 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 uslijed 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:

$$\varepsilon = 1 - (0,351 + 0,256 \cdot \beta^4 + 0,93 \cdot \beta^8) \cdot \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{1/\kappa} \right] \quad (28)$$

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 mjerjenje protoka pomoću oštре prigušnice glase:

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

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

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

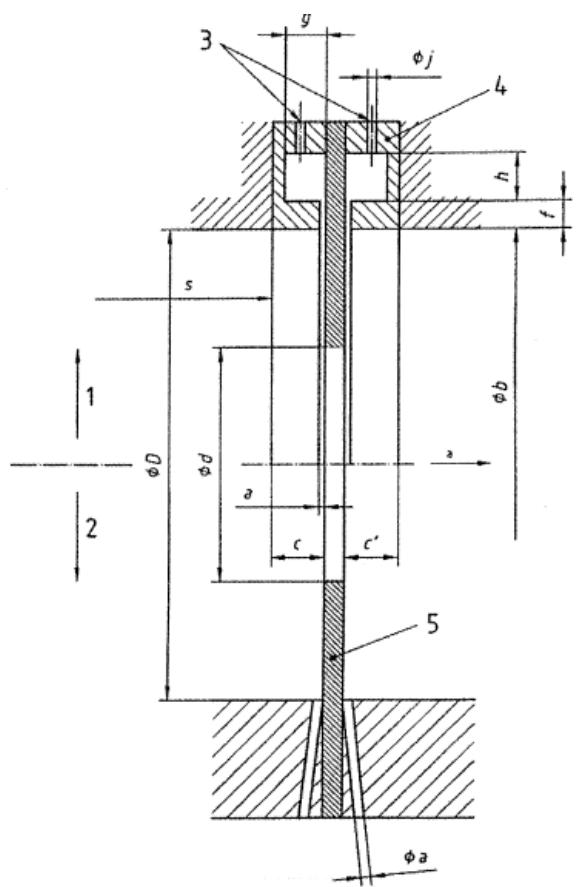
$$0,23 \leq \beta \leq 0,80$$

4.2.b Ograničenja u pogledu Red 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 oštре prigušnice

5.

REZULTATI MJERENJA I MJERNA NESIGURNOST

5.1. *Rezultati mjerena*

Tablica 1.: Prvo mjerjenje ulaznih vrijednosti na mjernej liniji

Redni broj mjerena	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
Isr [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
qv [m³/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
tv [°C]	23,2	23,4	23,8	23,7	23,7	23,8	23,8
tu[°C]	20,2	20,5	20,7	20,7	20,7	20,9	20,9
Δp mikromanometra [Pa]	256, 5	254,9	247,1	233,0	187,7	79,8	37,5
Δp diferencijalni pretvornik [Pa]	253, 8	252,0	245,0	230,8	186,5	73,5	34,4

Tablica 2.: Dobiveni rezultati prvoga mjerena

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 [m²]	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
qm[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 mjerjenje ulaznih vrijednosti na mjernej liniji

Redni broj mjerena	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 [m³/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
tv [°C]	23,6	23,7	23,8	23,9	23,9	23,9	24,0
tu [°C]	20,5	20,8	20,8	20,8	20,9	20,8	20,8
Δp mikromanometra [Pa]	256,5	253,4	247,1	234,6	195,5	98,5	32,8
Δp diferencijalni pretvornik [Pa]	253,9	251,5	243,6	233,6	192,9	93,8	29,4

Tablica 4.: Dobiveni rezultati drugog mjerena

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 [m²]	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
qm[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

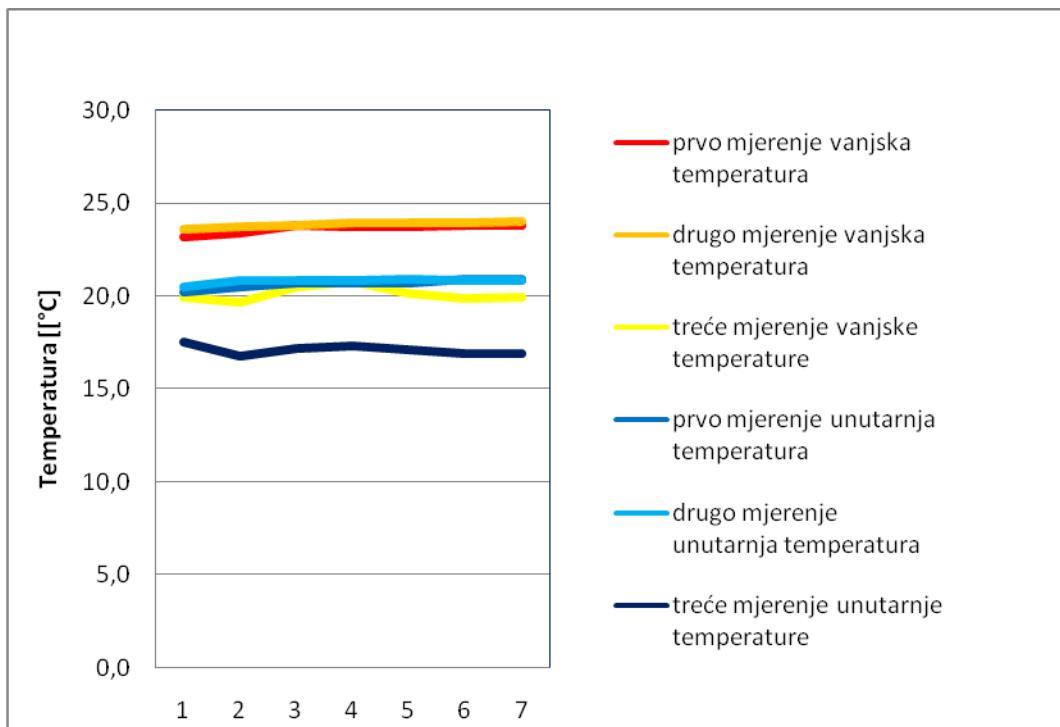
Tablica 5.: Treće mjerene ulaznih vrijednosti na mjernej liniji

Redni broj mjerjenja	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 [m³/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
tv [°C]	23,6	23,7	23,8	23,9	23,9	23,9	24,0
tu [°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
lsr [mm]	81,3	80,8	78,6	191,4	168,3	92,8	29,5
Δpdiferencijalni pretvornik [Pa]	264	260,8	253	244	213,5	112,38	31,8
p1 [Pa]	318	315,9	307	299,3	263,2	145,13	46,9
p2 = p1 - Δp [Pa]	54,2	55,16	54,7	55,33	49,71	32,756	15,2

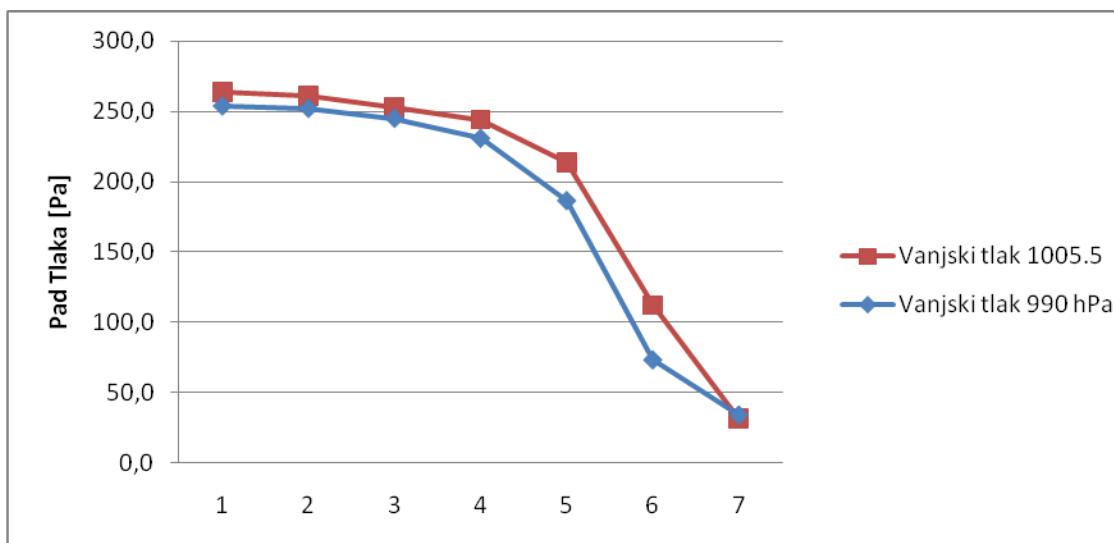
Tablica 6.: Dobiveni rezultati trećeg mjerjenja

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 [m²]	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
qm[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

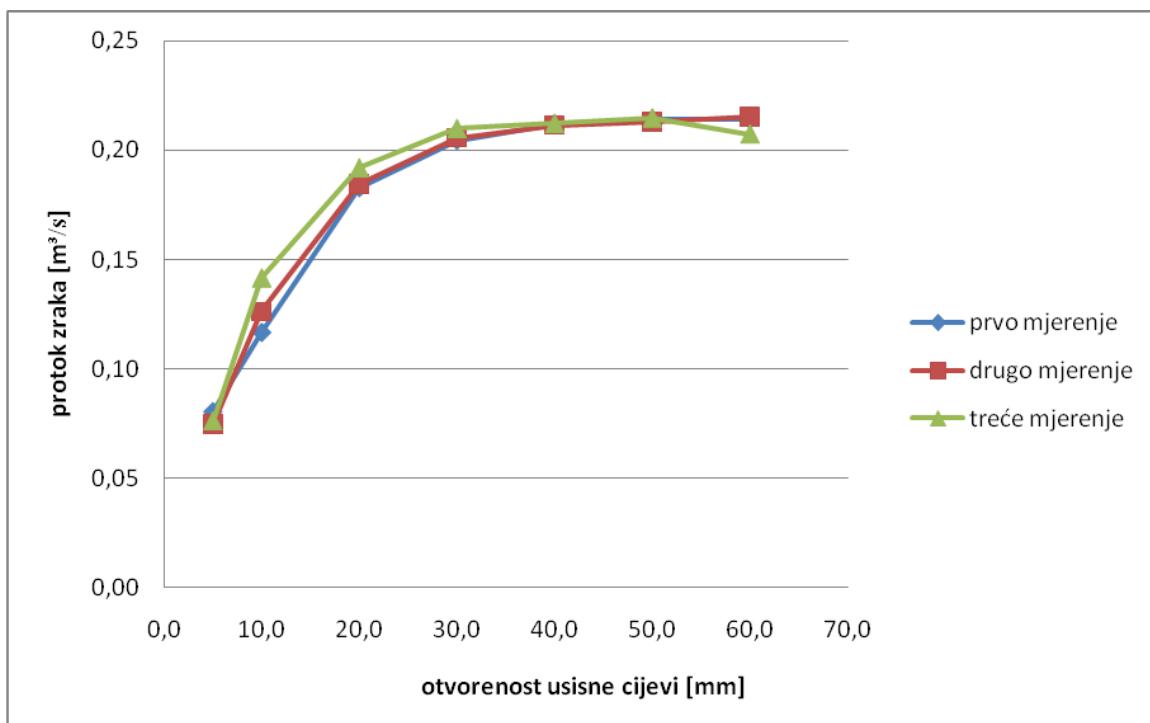
5.2. Mjerna nesigurnost



Dijagram 1.: Promjene unutarnje i vanjske temperature prilikom mjerena



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

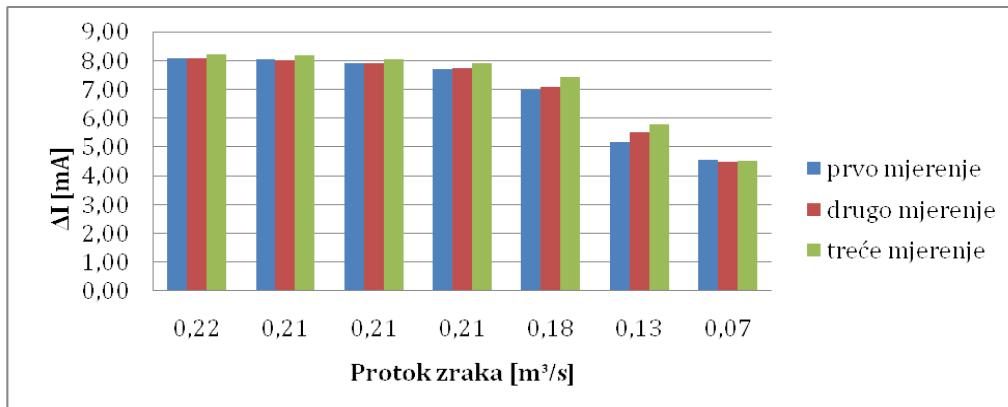


Dijagram 3.: Ovisnost protoka zraka o otvoru za usis zraka

Tablica 7.: Mjerna nesigurnost kod mjerena diferencijalnim pretvornikom tlaka

Diferencijalni pretvornik	1	2	3	4	5	6	7
Mjereno	8,03	7,98	7,91	7,68	7,14	5,5	4,48
1	8,05	8,02	7,88	7,81	7,08	5,49	4,47
2	8,06	8,05	7,9	7,76	7,18	5,53	4,45
3	8,14	7,98	7,92	7,73	6,98	5,52	4,46
4	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 mjerenu diferencijalnim pretvornikom [Pa]							2,8687



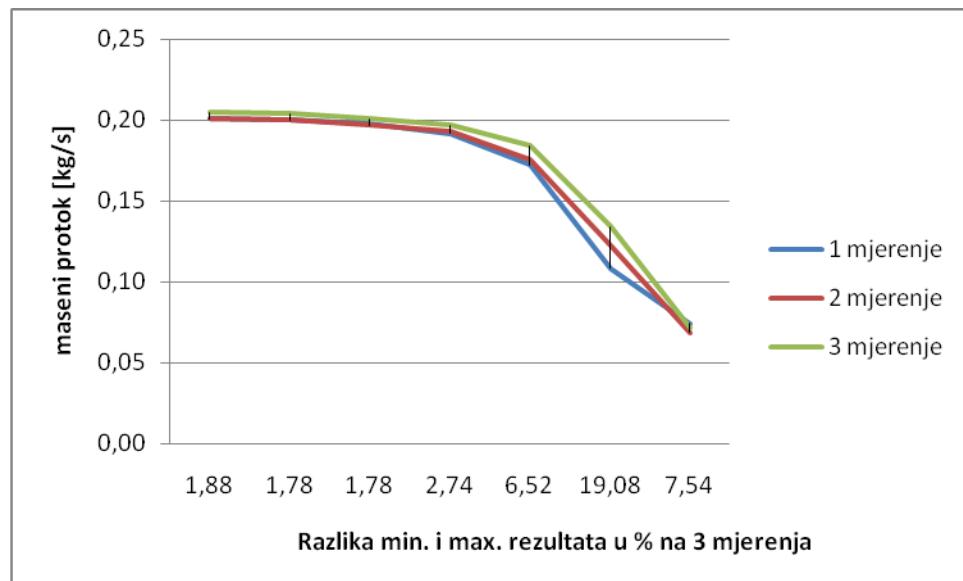
Dijagram 4.: Razlike u očitanju struje pri sva tri mjerena

Tablica 8.: Mjerena nesigurnost kod mjerena mikromanometrom

Mikromanometru	1	2	3	4	5	6	7	
Mjereno	1	82	80	79	192	169	92	30
1	81	80,5	78,5	191	168	92,5	29,5	
2	81	81	79	192	167,5	93	29,5	
3	81,5	81,5	78	191	168	93,5	29	
4	81	81	78,5	191	169	93	29,5	
5	81,3	80,8	78,6	191,4	168,3	92,8	29,5	
hsr[mm]	0,4472	0,5701	0,4183	0,5477	0,6708	0,5701	0,3536	
s[mm]	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 mjerenu mikromanometrom [Pa]							4,7210	

Tablica 9.: Razlike u izračunu protoka nakon svakog mjerjenja

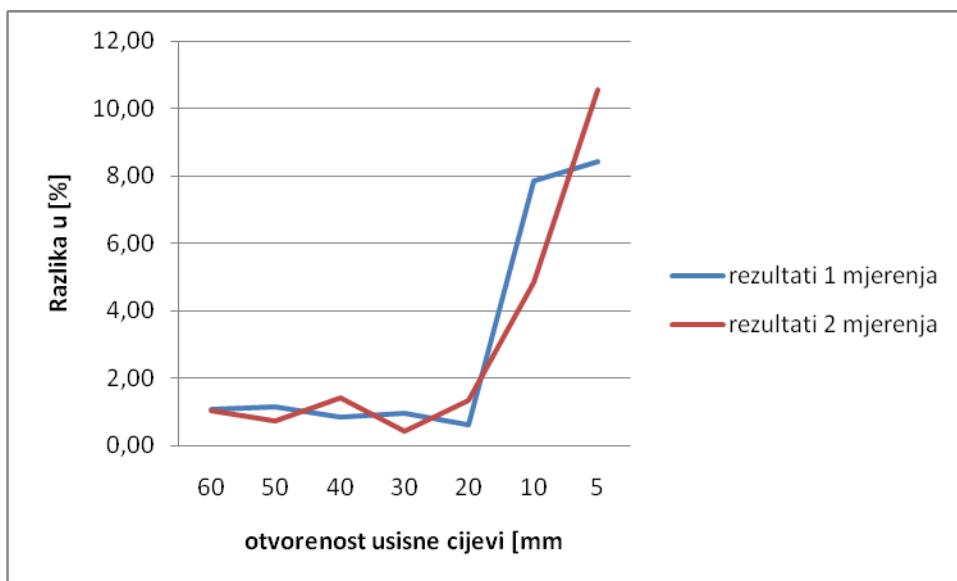
razlika protoka na mjerjenjima	1	2	3	4	5	6	7
1 mjerjenje [kg/s]	0,214	0,214	0,212035	0,204	0,183	0,1168	0,0807
2 mjerjenje [kg/s]	0,215	0,213	0,211527	0,206	0,185	0,1263	0,0748
3 mjerjenje [kg/s]	0,208	0,215	0,21229	0,21	0,192	0,1415	0,0762
Razlika [%]	3,643	0,964	0,359281	2,662	4,762	17,46	7,282



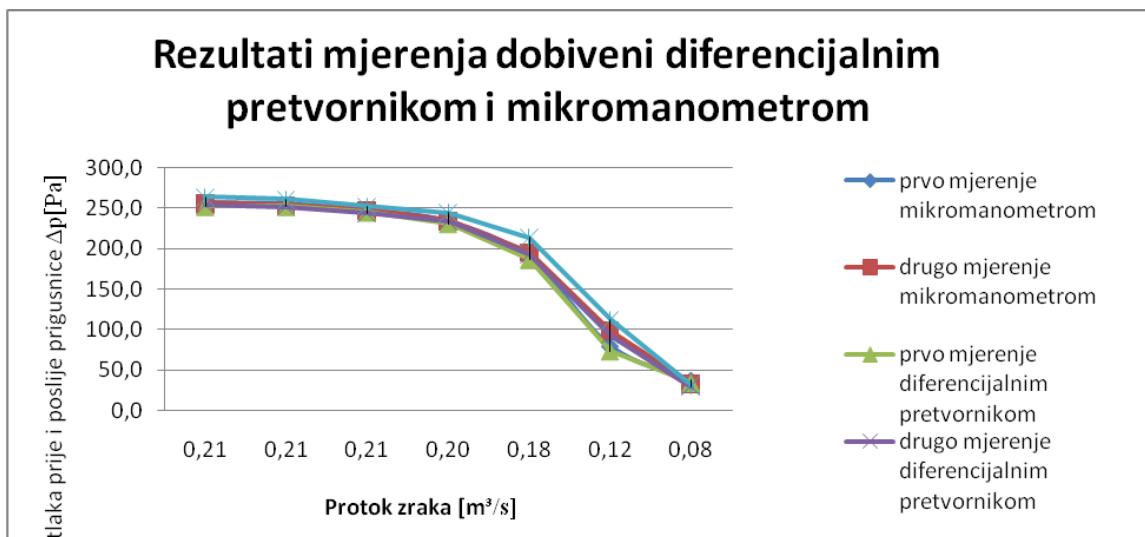
Dijagram 5.: Razlike u izračunu protoka

Tablica 10.: Razlike u očitanju mjerjenja diferencijalnog pretvornika i mikromanometra

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



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



Dijagram 7.: Ovisnost pada tlaka o protoku zraka

6.

ZAKLJUČAK

U radu je razrađen postupak mjerjenja protoka mjernom prigušnicom. Prikazana je merna linija za mjerjenje sa oštom prigušnicom, postupci mjerjenja, proračun brzina strujanja protočnih količina te primjer sa rezultatima.

Mjerena pokazuju neka odstupanja u odnosu na neki relevantni faktor, u ovom radu to je krilni anemometar iako on ne predstavlja etalon vec služi samo kako bi dao neke orientacijske 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 mjerjenja. 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 [m^3/s]. Prosječne razlike rezultata mjerjenja volumenskog protoka na anemometru su do 5,3 %, dok na oštroj prigusnici mjerjenje protočne mase su do 5,9 %. Na temelju ovih rezultata možemo zaključiti da mjerjenje oštom prigušnicom na ovoj mernoj liniji je adekvatno za školske primjere mjerjenja no ne i za ozbiljnija mjerena padova tlaka.

7. POPIS LITERATURE

- [1] Virag Z., *Mehanika fluida: Odabrana poglavla, 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 mjerjenja), 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*