

Poboljšanje mogućnosti mjerenja protoka vode u području do 50 l/min

Tomašić, Miro

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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:235:485290>

Rights / Prava: [Attribution-NoDerivatives 4.0 International](#)/[Imenovanje-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-24**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Miro Tomašić

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec, dipl. ing.

Student:

Miro Tomašić

Zagreb, 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojoj mentorici dr. sc. Lovorki Grgec Bermanec, na ukazanom povjerenju, podršci, pomoći tijekom izrade rada, razumijevanju i rješavanju svih problema koji su se javljali.

Miro Tomašić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 20 - 6 / 3	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Miro Tomašić**

Mat. br.: 0035204852

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Poboljšanje mogućnosti mjerenja protoka vode u području do 50 l/min**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Improvement of water flow measurements in the range up to 50 l/min**

Opis zadatka:

Potrebno je poboljšati mogućnosti mjerenja i reguliranja protoka vode na laboratorijskoj mjernoj liniji za istraživanje kavitacije Laboratorija za vodu, gorivo i mazivo. Na postojećem mjernom sustavu potrebno je zamijeniti 'stara' mjerila (rotametar i pretvornik tlaka na oštroj prigušnici) novim elektromagnetskim mjerjačem protoka i diferencijalnim pretvornikom te ponovno karakterizirati mjerni sustav.

Usporediti i analizirati mjerenja protoka u zadanom području dobivena pomoću tri metode: metodom promjenjive površine (rotametrom), elektromagnetskim mjerjačem i metodom prigušivanja. U radu koristiti postojeću mjernu opremu i programsku podršku Laboratorija za procesna mjerenja i Laboratorija za vodu, gorivo i mazivo Fakulteta strojarstva i brodogradnje, te razmotriti mogućnosti poboljšanja zadanog mjernog sustava.

Potrebno je izraditi:

- Pregled normi i metoda mjerenja protoka vode do 50 l/min.
- Prikaz mjerne linije za istraživanje kavitacije sa pripadajućim mjerilima protoka, tlaka i temperature.
- Opis postupka mjerenja sa rezultatima.
- Proračun brzina strujanja, protočnih količina i mjerne nesigurnosti za sva mjerenja.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

24. rujna 2020.

Datum predaje rada:

26. studenoga 2020.

Predviđeni datum obrane: ;

30.11. – 4.12.2020.

Zadatak zadan:

Prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	3
POPIS TABLICA	4
SAŽETAK	5
SUMMARY	6
1. UVOD	7
2. OPĆENITO O PROTOKU	8
2.1. Povijest mjerenja protoka.....	8
2.2. Osnovne jednačbe	9
2.2.1. Jednačba kontinuiteta.....	9
2.2.2. Zakon očuvanja mase.....	10
2.2.3. Bernoullijeva jednačba.....	10
2.2.4. Gubitak energije u cijevi.....	11
2.3. Metode mjerenja protoka	12
2.3.1. Elektromagnetski protokomjer.....	13
2.3.2. Mjerna prigušnica	15
3. MJERNA LINIJA	19
3.1. Karakteristike mjerne linije.....	19
3.2. Dijelovi mjerne linije	21
3.2.1. Pumpa	21
3.2.2. Elektromagnetski protokomjer.....	22
3.2.3. Standardna mjerna prigušnica DN 25	23
3.2.4. Nestandardne mjerne prigušnice.....	24
3.2.5. Diferencijalni mjerač tlaka.....	25
3.2.6. Cijevi.....	26
4. MJERNA NESIGURNOST	27
4.1. Procjena mjerne nesigurnosti tipa A	27
4.2. Procjena mjerne nesigurnosti tipa B.....	28
4.3. Kombinirana mjerna nesigurnost	28
4.4. Koeficijenti osjetljivosti	28
4.5. Proširena mjerna nesigurnost	29

5.	MJERENJA.....	30
6.	PRORAČUNI I ANALIZA REZULTATA.....	32
6.1.	Proračun protoka standardne prigušnice	32
6.2.	Usporedba protoka standardne prigušnice	39
6.3.	Usporedba protoka nestandardnih prigušnica	42
6.3.1.	Nestandardna prigušnica $d = 2 \text{ mm}$	42
6.3.2.	Nestandardna prigušnica $d = 9 \times 3 \text{ mm}$	45
6.3.3.	Usporedba standardne i nestandardne prigušnice $d = 2 \text{ mm}$	50
6.3.4.	Usporedba standardne i nestandardne prigušnice $d = 9 \times 3 \text{ mm}$	51
6.4.	Usporedba svih prigušnica	53
7.	PRORAČUN MJERNE NESIGURNOSTI	55
7.1.	Mjerna nesigurnost prigušnice	55
7.2.	Mjerna nesigurnost elektromagnetskog protokomjera	61
7.3.	Usporedba mjernih nesigurnosti.....	62
8.	ZAKLJUČAK	64
	LITERATURA	65

POPIS SLIKA

Slika 1.	Jednadžba kontinuiteta nestlačivog fluida.....	10
Slika 2.	Bernoulijeva jednadžba	11
Slika 3.	Načelo rada elektromagnetskog potokomjera	13
Slika 4.	Princip rada mjerne prigušnice.....	15
Slika 5.	Δw za različite vrste prigušenja.....	16
Slika 6.	Mjerna linija	19
Slika 7.	Shematski prikaz mjerne linije.....	20
Slika 8.	Pumpa.....	21
Slika 9.	Elektromagnetski protokomjer Endress Hauser	22
Slika 10.	Mjerna prigušnica DN 25.....	23
Slika 11.	Mjerne prigušnice (2 mm i 9x3 mm)	24
Slika 12.	Diferencijalni mjerač tlaka Endress+Hauser	25
Slika 13.	Cijev 32 mm.....	26
Slika 14.	Usporedba protoka prigušnice DN 25 pri višoj temperaturi	37
Slika 15.	Usporedba protoka prigušnice DN 25 pri nižoj temperaturi.....	39
Slika 16.	Ovisnost Reynoldsovog broja Re_D i koeficijenta C prigušnice DN 25	41
Slika 17.	Ovisnost pada tlaka Δp o koeficijentu C prigušnice DN 25	41
Slika 18.	Usporedba izmjerenih protoka prigušnice DN 25 i $d=2\text{mm}$	51
Slika 19.	Usporedba izmjerenih protoka prigušnice DN 25 i $d=9\text{x}3\text{ mm}$	52
Slika 20.	Usporedba padova tlaka svih prigušnica.....	53
Slika 21.	Usporedba izmjerenih i izračunatih protoka svih prigušnica.....	54
Slika 22.	Usporedba mjernih nesigurnosti	62

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Protoci za mjernu liniju bez prigušnice	30
Tablica 2.	Standardna prigušnica DN25	30
Tablica 3.	Nestandardna prigušnica 2 mm.....	31
Tablica 4.	Nestandardna prigušnica 9x3 mm.....	31
Tablica 5.	Podaci za sve točke prigušnice DN 25.....	35
Tablica 6.	Rezlutati pri nižoj temperaturi prigušnice DN 25.....	37
Tablica 7.	Usporedba izračunatih ptoroka pri različitim temperaturama	40
Tablica 8.	Usporedba izmjerenih protoka pri različitim temperaturama	40
Tablica 9.	Podaci za nestandardnu prigušnicu d = 2mm za višu temperaturu.....	42
Tablica 10.	Podaci za nestandardnu prigušnicu d = 2 mm pri nižoj temperaturi.....	43
Tablica 11.	Podaci za nestandardnu prigušnicu 9x3 mm mjereni pri višoj temperaturi.	46
Tablica 12.	Podaci za nestandardnu prigušnicu 9x3 mm mjereni pri nižoj temperaturi.	48
Tablica 13.	Usporedba izračunatih protoka prigušnica DN 25 i d=2 mm.....	50
Tablica 14.	Usporedba izračunatih protoka prigušnica DN 25 i d=9x3 mm	51
Tablica 15.	Mjerna nesigurnost u točki 1	56
Tablica 16.	Mjerna nesigurnost u točki 2.....	57
Tablica 17.	Mjerna nesigurnost u točki 3	57
Tablica 18.	Mjerna nesigurnost u točki 4.....	58
Tablica 19.	Mjerna nesigurnost u točki 5	58
Tablica 20.	Mjerna nesigurnost u točki 6.....	59
Tablica 21.	Mjerna nesigurnost u točki 7	59
Tablica 22.	Mjerna nesigurnost u točki 8.....	60
Tablica 23.	Mjerna nesigurnost u točki 9	60
Tablica 24.	Mjerna nesigurnost u točki 10.....	61
Tablica 25.	Mjerne nesigurnosti elektromagnetskog protokomjera.....	62

SAŽETAK

U ovom radu cilj je usporediti rezultate mjerenja protoka pomoću elektromagnetskog protokomjera tvrtke Endress Hauser i tri mjerne prigušnice od kojih je jedna standardna prigušnica DN 25, a dvije nestandardne prigušnice. Jedna nestandardna prigušnica ima promjer otvora 2 mm, a druga ima 9 otvora od 3 mm. Mjerna linija se nalazi u Laboratoriju za vodu, gorivo i mazivo na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Mjerenja su provedena pri 10 pozicija jačine rada pumpe što daje 10 mjernih točaka. Protoci su računati pomoću proračuna za standardnu mjernu prigušnicu prema normi ISO 5167.

Na početku je prikazana kratka povijest mjerenja protoka, a zatim općenite jednadžbe koje opisuju strujanje i metode mjerenja protoka. Nakon toga prikazani su rezultati mjerenja za sve tri prigušnice pri dvije različite temperature, a nakon toga prikazan je primjer proračuna za jednu mjernu točku. Rezultati protoka svih prigušnica su prikazani u tablicama u kojima se vide odstupanja izračunatog protoka u odnosu na protok elektromagnetskog protokomjera. Na kraju je dana usporedba protoka svih mjernih prigušnica i mjerne nesigurnosti određene prema ISO GUM metodi. Ugradnjom elektromagnetskog protokomjera umjesto postojećeg rotametra i usporedbom sa prigušnicom došlo je do poboljšanja mogućnosti mjerenja na zadanoj mjernoj liniji.

SUMMARY

Main goal of this work was to compare the results of water flow measurement with Endress Hauser electromagnetic flow meter and three orifice plates where one is standard orifice DN 25 and two others are non-standard. First non-standard orifice plate has diameter of 2 mm and second has nine holes with 3 mm diameter. The system is in the Laboratory for water, fuel and lubricants at the Faculty of mechanical engineering and naval architecture, University of Zagreb. The measurements were performed at 10 pump strength positions which leads to 10 points of measuring. Flow calculation was performed according to ISO 5167 standard.

At the beginning, there is a historical part of flow measurement, after that there are general flow equations and flow measurement methods. Two different temperature results for each orifice plate are in the next chapter. Next chapter is consisted of standard orifice plate flow calculation of first measuring point. Results for each orifice plate are in the tables which also containing flow differences between electromagnetic flow meter and standard calculation. Comparison of all flow results and measurement uncertainties according to ISO GUM method, are at the end of this work. Improved measurement capabilities have been achieved by installing an electromagnetic flow meter instead of the existing rotameter and comparing it with an orifice plate.

1. UVOD

Mjerenje protoka je jedno je od najzastupljenijih mjerenja današnjice, a smatra se koristi već 4000 godina. Mjerenje je zastupljeno u svim granama industrije. Mjerenja su se razvijala kako se razvijala tehnologija i danas se mogu mjeriti protoci kapljevina, plinova pa čak i krutina. Najlakše je mjeriti protoke kapljevina jer se one smatraju nestlačivim, a kod mjerenja protoka plinova uzima se u obzir promjena temperature i tlaka zbog njihove stlačivosti. Mjerenja se najčešće svode na volumenski protok, a želimo li saznati maseni protok potrebno je poznavati gustoću fluida.

U ovom radu će biti prikazan proračun protoka pomoću standardne mjerne prigušnice koji će se usporediti sa elektromagnetskim protokomjerom tvrtke Endress Hauser. Također će se usporediti rezultati sa dvije nestandardne prigušnice od kojih je jedna interesantna jer uzrokuje kavitaciju.

2. OPĆENITO O PROTOKU

2.1. Povijest mjerenja protoka

Ljudi su prije 4000 godina imali potrebna znanja za kontrolirano navodnjavanje polja u Kini. Postoje još i zapisi iz Rima i Egipta o postavljanju dodatnih cijevi za povećanje protoka. Egipćani su procjenjivali protok rijeke Nil kako bi procijenili hoće li biti uspješna i plodna godina. Najstariji primjer je pješčani sat koji je mjerio vrijeme tako što mjeri protjecanje zrnaca pijeska. Oko 256. godina prije Krista u Kini primjenjuju sustav navodnjavanja Dujiangyan kako bi kontrolirali poplave i očuvali veće količine vode. Više od 5300 km² se još danas navodnjava na isti način na tom području.

Do 15. stoljeća nema previše zapisa o mjerenju protoka. Prve matematičke proračune vezano za mjerenje protoka daje Leonardo da Vinci na temelju proučavanja pare koji pomažu pri izgradnji luka i kanala u Italiji u 16. stoljeću. Najveći napredak vezano za protok se ostvario u 18. stoljeću. Zaslužni za taj napredak su bili Daniel Bernoulli i Leonard Euler koji su školovani na sveučilištu u Baselu u Švicarskoj. Bernoullijeva jednadžba je i danas jedna od osnovnih jednadžbi mehanike fluida u kojoj povezuje brzinu fluida i tlak. Eulerova jednadžba se koristi kod turbostrojeva. Ostala značajna imena 18. stoljeća po kojima su nazvani mjerači protoka su: Henri Pitot, Giovanni Battista Venturi i Henry Darcy. Karl Kueppers je njemački inženjer koji je zaslužan za razvoj prvog mjerača protoka koji ima mogućnost mijenjanja površine. Uređaj je lansiran na tržište 1908. godine i početna svrha je bila mjerenje protoka vode. Korišten je plovak u staklenoj cijevi te je uređaj poznat pod nazivom rotametar. 1912. godine Tollbar je iznio novu teoriju nazvanu Tollbar vrtlog. Neke od tvrtki koje su se bavile mjerenjem protoka su nazvane po imenima kao što su: Kent, Simens, Tylor, Kennedy, Herschel. Jedna od najpoznatijih ideja u tom razdoblju je bila Venturijeva cijev. Koristili su se još i mjerači protoka sa propelerom i Pitotova cijev.

Prva primjena oštne prigušnice bila je vezana za plinovod 1890. godine u Ohio-u. Zahvaljujući njemačkim i engleskim inženjerima prigušnica je dovedena u današnji oblik. Današnja norma ISO 5167 se odnosi na mjerenje protoka prigušnicom, a temelje za to je postavio professor Beitler sa svojim eksperimentima mjerenja protoka. 1940-ih godina su razvijeni turbinski mjerači protoka, a nakon toga se razvijaju vortex, magnetni i ultrazvučni mjerači protoka.

2.2. Osnovne jednađžbe

U prirodi se tvari nalaze u tri oblika: krutine, kapljevine i plinovi. Kapljevine i plinove zajedno nazivamo tekućinama. Mogu se mjeriti protoci svih tvari neovisno o agregatnom stanju, a mogu se čak mjeriti i mješavine više agregatnih stanja. Najtočnije je mjerenje jednog agregatnog stanja.

Najbitniji zakoni vezani za strujanje fluida su:

- zakon očuvanja mase
- jednađžba kontinuiteta
- Bernoulijeva jednađžba

Za izračun je potrebno znati:

- Reynoldsov broj
- profil cijevi
- vrsta fluida
- tlak
- viskozitet
- temperatura

2.2.1. Jednađžba kontinuiteta

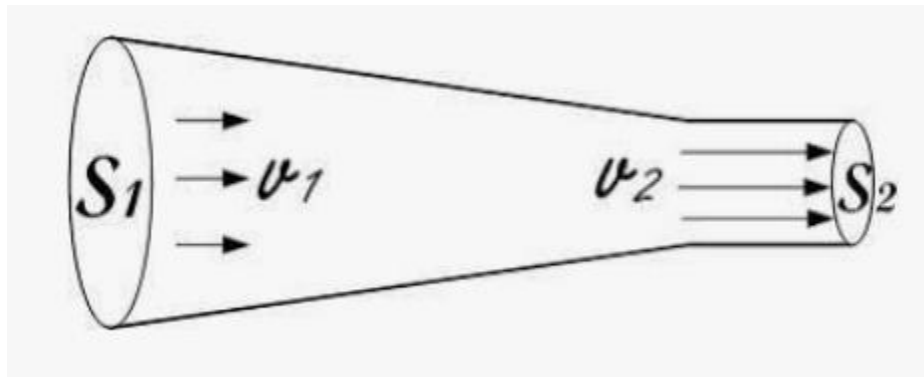
Ovaj zakon nam govori da je protok u cijevi u svakom presjeku isti. Iz života je poznato da je brzina strujanja rijeke veća na onim mjestima gdje je korito uže, a manja na širim dijelovima.

$$Q_1 = Q_2 \quad [1]$$

$$v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2 \quad [2]$$

$$v_1 < v_2 \quad [3]$$

$$S_1 > S_2$$



Slika 1. Jednadžba kontinuiteta nestlačivog fluida

2.2.2. Zakon očuvanja mase

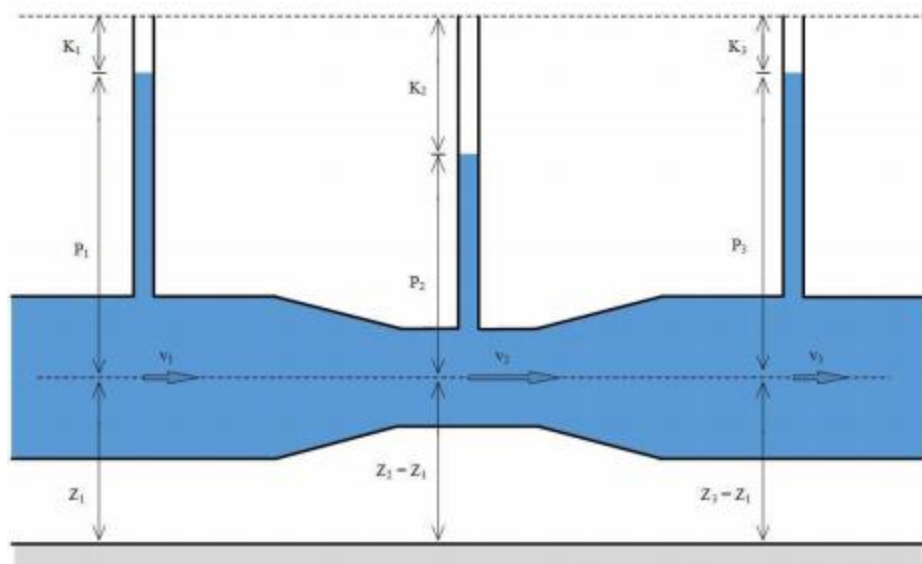
Ovaj zakon govori da masa ne može ni iz čega nastati ni nestati. Protok mase je jednak u svakom presjeku. Ovaj zakon se najviše koristi kod strujanja stlačivih fluida kod kojih dolazi do promjene gustoće.

$$Qm_1 = Qm_2 \quad [4]$$

$$\rho_1 \cdot v_1 \cdot S_1 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot S_2 \quad [5]$$

2.2.3. Bernoullijeva jednadžba

Ovo je osnovni zakon gibanja fluida, a proizlazi iz primjene zakona o očuvanju energije na strujanje fluida. Bernoullijeva jednadžba prikazuje odnos između brzine, gustoće i tlaka fluida u kretanju. Jednadžba govori da je u svakom presjeku strujanja fluida jednak zbroj statičnog, dinamičnog tlaka i geodetske visine.



Slika 2. Bernoulijeva jednadžba

$$K = \frac{v^2}{2 \cdot g}; \quad P = \frac{p}{\rho \cdot g}; \quad Z = h$$

$$K_1 + P_1 + Z_1 = K_2 + P_2 + Z_2 = K_3 + P_3 + Z_3 \quad [6]$$

2.2.4. Gubitak energije u cijevi

U predhodnim jednadžbama zanemareni su gubici u cjevovodima uslijed strujanja. Gubitke možemo podijeliti na linijske i lokalne. Linijski gubici nastaju zbog trenja između stijenki cjevovoda i fluida, a lokalni zbog naglog suženja i proširenja ili koljena u cjevovodu. Pad tlaka uslijed trenja u cjevovodu je:

$$\Delta p_{\text{trenje}} = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \quad [7]$$

λ – koeficijent trenja se očitava iz Moody-eva dijagrama

L – dužina cjevovoda

D – promjer cjevovoda

ρ – gustoća fluida

v – brzina fluida

Lokalni otpori se računaju prema:

$$\Delta p_{\text{lokalno}} = \left(1 - \frac{d}{D}\right)^2 \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2; \quad \Delta p_{\text{lokalno}} = K \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \quad [8]$$

d – promjer cjevovoda prije proširenja

D – promjer cjevovoda nakon proširenja

v – brzina prije proširenja

K – koeficijenti ako imamo promjene pravca cjevovoda, koljena ili sl.

2.3. Metode mjerenja protoka

Danas postoji jako puno različitih mjerila protoka te je potrebno poznavati svojstva fluida i očekivane minimalne i maksimalne vrijednosti protoka kako bi se odabrali adekvatni mjerači protoka. Cijena ne smije biti jedini faktor prilikom odabira jer kasnije može doći do velikih problema u radu ako se ne uzme adekvatan mjerač protoka.

Najčešće korištene metode su metode kod kojih se javlja dodatan pad tlaka prilikom mjerenja, a to su: mjerači sa rotorom, mjerači sa suženjem te prigušnicom. S druge strane postoje mjerači koji ne uzrokuju dodatan pad tlaka kao što su: ultrazvučni i magnetski protokomjeri.

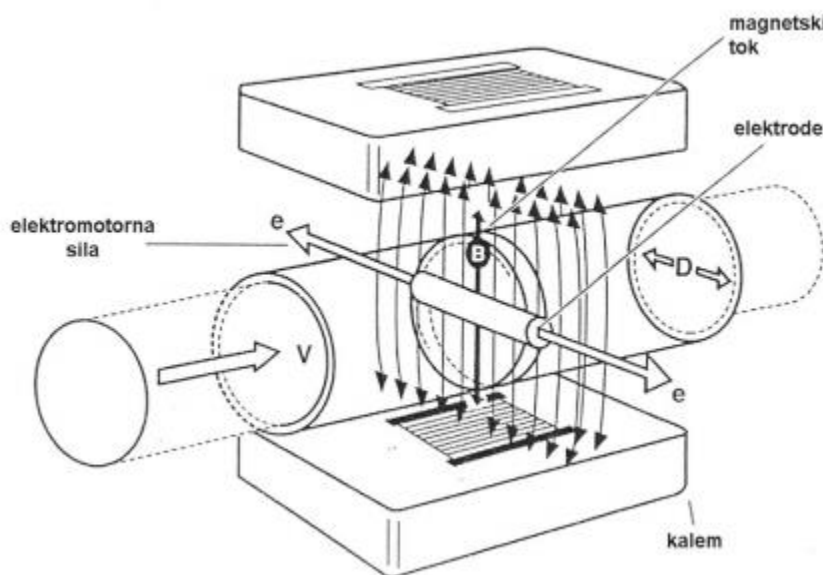
Još jedna od podjela je:

- mehanički protokomjeri (mjerna turbina, rotametar)
- elektronični protokomjeri (vrtložni protokomjer, elektromagnetski prtokomjer, ultrazvučni, protokomjer sa Dopplerovim efektom)
- tlačni protokomjeri (mjerna prigušnica, Venturijeva, Pitotova cijev)

U nastavku će se detaljnije opisati princip rada mjerne prigušnice i elektromagnetskog protokomjera jer se oni koriste u ovom radu.

2.3.1. Elektromagnetski protokomjer

Rad ovog uređaja se zasniva na pojavi da tekućina djeluje kao električni vodič unutar cijevi. Na cijevi je sa svake strane postavljena elektroda koja je izolirana od same stijenke cijevi. Unošenjem magnetskog toka dolazi do pojave napona uslijed elektromotorne sile. Kako bi se izbjegla trajna polarizacija elektroda upotrebljava se izmjenično magnetsko polje.



Slika 3. Načelo rada elektromagnetskog potokomjera

Faradayev zakon magnetske indukcije govori da napon koji je stvoren u zatvorenom krugu proporcionalan gustoći magnetskog toka koji pod pravim kutom presjeca taj krug. Magneti stvaraju magnetski tok duž osi y. Stvoreni napon između elektroda je proporcionalan protoku. Faradayev zakon je:

$$E = k \cdot B \cdot d \cdot v \quad [9]$$

E – inducirani napon

k - konstanta

B - gustoća magnetskog toka

d – udaljenost između elektroda

v – brzina tekućine

Nakon što se izraz za brzinu napiše kao:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2} \quad [10]$$

i uvrsti u Faradayev izraz dobije se:

$$Q = \frac{\pi \cdot d}{4 \cdot k \cdot B} \cdot E \quad [11]$$

Iz prethodnog izraza vidi se da je inducirani napon direktno proporcionalan volumnom protoku Q .

Prednosti:

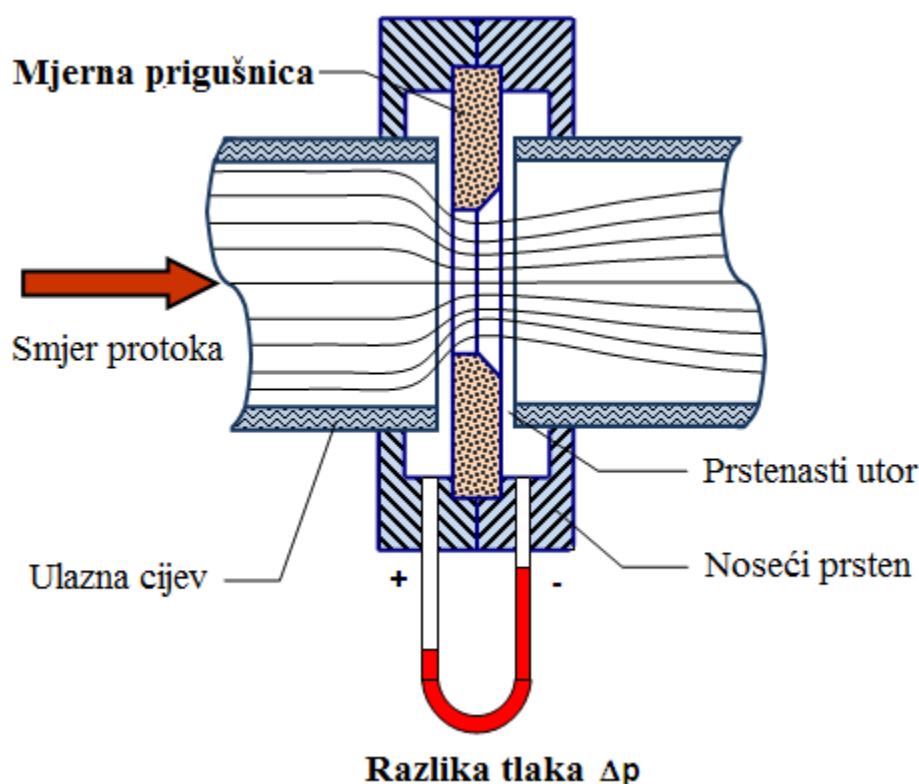
- tok tekućine je neometan
- ne uzrokuje pad tlaka
- neosjetljiv na promjenu temperature i tlaka
- laminarni, turbulentni i prijelazni tok
- brz odziv
- točnost 0,5 – 1 %
- mogućnost mjerenja emulzija

Nedostatci:

- tekućina mora biti električki vodljiva
- nije primjenjivo za ugljikovodike i deioniziranu vodu
- cijev je potrebno uzemljiti

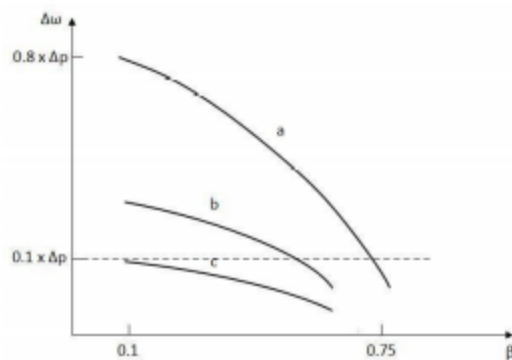
2.3.2. Mjerna prigušnica

Mjerna prigušnica je tanka ploča s otvorom u sredini koji je puno veći od debljine ploče. Ploča je koncentrična s osi cjevovoda. Zbog pojave turbulencija nastaju povećani gubici pa je za mjerila s prigušnicama karakterističan najveći diferencijalni tlak Δp , što rezultira visokom osjetljivošću. Za pad tlaka se mogu koristiti još i Venturijeva i Pitotova cijev. Uslijed suženja dolazi do porasta brzine sa v_1 na v_2 . Sukladno tome se dinamički tlak povećava, a statički tlak smanjuje. Ova razlika tlaka je direktan pokazatelj protoka u cijevi.



Slika 4. Princip rada mjerne prigušnice

Dodatni pad tlaka Δw je ovisan o omjeru promjera otvora prigušnice i promjera cijevi $\beta = \frac{d}{D}$. Na slici je prikazan omjer pada tlaka Δw u odnosu na pad tlaka Δp .



Slika 5. Δw za različite vrste prigušenja

Krivulja *a* odnosi se na oštru prigušnicu, krivulja *b* se odnosi na mlaznicu, a pod krivuljom *c* se nalazi Venturijeva cijev. Iscrtkana linija se odnosi na Pitotovu cijev. Iz dijagrama se vidi da je najmanji pad tlaka za Venturijevu cijev što znači da je taj način mjerenja neprecizniji od ostalih.

Jednadžba za izračun protoka pomoću mjerne prigušnice je:

$$Q_m = C \cdot E \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho} \quad [12]$$

$$Q_v = \frac{Q_m}{\rho} \quad [13]$$

C – koeficijent pražnjenja

E – faktor pristupne brzine

ε – za nestlačive fluide jednak jedinici

d – promjer otvora prigušnice

Δp – pad tlaka

ρ – gustoća fluida

Koeficijenti C , E i ε su bezdimenzijske veličine koje se određuju eksperimentalno. Najzahtjevniji je proračun koeficijenta C .

Potrebno je odrediti promjere u pogonskom stanju:

$$d = d_o [1 + \alpha_d (t - t_o)] \quad [14]$$

$$D = D_o [1 + \alpha_D (t - t_o)] \quad [15]$$

t_o je temperatura okoline, a d_o i D_o su nazivni promjeri prigušnice i cjevovoda. α_d i α_D su linearni koeficijenti toplinskog produljenja prigušnice odnosno cjevovoda. Temperatura t je temperature fluida koji struji kroz prigušnicu.

Kvocijent promjera u pogonskom stanju daje bezdimenzijski odnos svijetlih otvora prigušnice:

$$\beta = \frac{d}{D} \quad [16]$$

Reynoldsova značajka se računa prema izrazu:

$$Re = \frac{w_D \cdot D \cdot \rho}{\mu} \quad [17]$$

Brzina w se odnosi na brzinu prije prigušnice u cjevovodu. Gustoća se računa pomoću izraza:

$$\rho = 1000 \cdot [1 - \frac{T + 288,9414}{508929,2 \cdot (T + 68,12963)} \cdot (T - 3,9863)^2] \quad [18]$$

Dinamička viskoznost slijedi iz izraza:

$$\mu = 0,0000241 \cdot 10^{\left(\frac{247,8}{T - 140} \right)} \quad [19]$$

Faktor pristupne brzine obuhvaća povećanje brzine nastalo uslijed suženja i opisan je jednadžbom:

$$E = \frac{D^2}{\sqrt{D^4 - d^4}} \quad [20]$$

Koeficijent C se računa prema izrazu:

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

$$(0,0188 + 0,0063 \cdot A) \cdot \beta^{3,5} \cdot \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0,3} \quad [21]$$

Gdje je koeficijent A jednak:

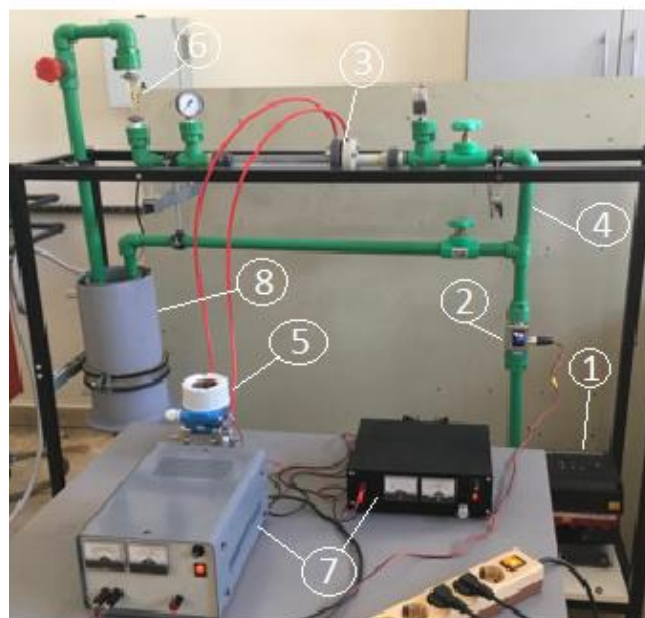
$$A = \left(\frac{19000 \cdot \beta}{Re_D} \right)^{0,8} \quad [22]$$

Svi izrazi su određeni prema normi ISO 5167-2:2003 u kojoj je definirana geometrija prigušnice, hrapavost obrade i način provjere zadanih ograničenja. Zahtjevi i ograničenja definirani su u točki 6 ove norme. U slučaju da cjevovod nije dovoljno dugačak da se izravna strujanje onda se moraju koristiti uređaji za izravnavanje strujanja, a to je isto definirano u normi.

3. MJERNA LINIJA

3.1. Karakteristike mjerne linije

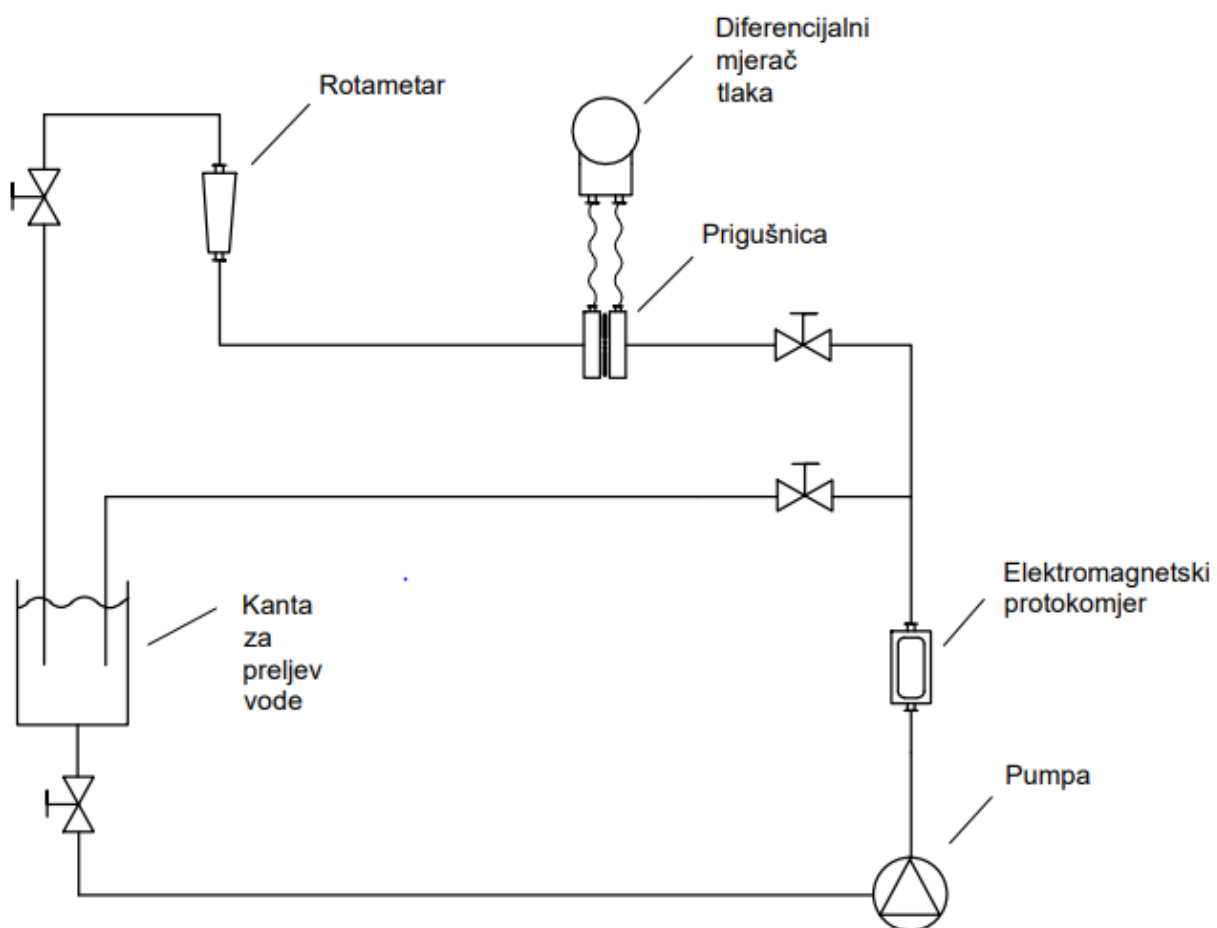
U ovom radu je korištena mjerna linija u Laboratoriju za vodu, gorivo i mazivo na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, a elektromagnetski protokomjer i prigušnice su korištene sa Katedre za toplinsku i procesnu tehniku. Kako bi se vidio koliko je točan protok koji pokazuje elektromagnetski protokomjer prvo će se izračunati protok pomoću prethodno prikazanog proračuna za standardnu mjernu prigušnicu. Nakon toga će se izračunati protok pomoću dvije nestandardne mjerne prigušnice i usporediti sa elektromagnetskim protokomjerom. Termometar za mjerenje temperature fluida se nalazi unutar elektromagnetskog protokomjera, a on je potreban za proračun temperature, viskoznosti i toplinskog produljenja.



Slika 6. Mjerna linija

- | | |
|--------------------------------|----------------------------------|
| 1 pumpa | 5 diferencijalni mjerač tlaka |
| 2 elektromagnetski protokomjer | 6 rotametar |
| 3 mjerna prigušnica | 7 napajanja istosmjernom strujom |
| 4 cijevi | 8 posuda za preljev vode |

Na sljedećoj slici shematski je prikazana mjerna linija.



Slika 7. Shematski prikaz mjerne linije

Mjerna prigušnica i elektromagnetski protokomjer su glavni dijelovi mjerne linije te su ostali dijelovi prilagođeni njima. Pumpa je korištena u svom cijelom radnom području od 10 stupnjeva rada. Nakon prigušnice se nalazi rotametar koji se nije koristio u ovom radu zbog ograničenog mjernog područja. Termometar se nalazi unutar elektromagnetskog protokomjera. Temperaturu

nije bilo moguće održavati konstantnom zato što bi pumpa počela zagrijavati vodu već nakon četvrtog stupnja rada. Za svaku mjernu prigušnicu su provedena dva mjerenja protoka na različitim početnim temperaturama medija od barem 8 °C.

3.2. Dijelovi mjerne linije

3.2.1. Pumpa

Proizvođač: Grundfos

Model: MGE90C 2-CMS2A-HA

Snaga: 1,50 kW

Brzina vrtnje: 2900 – 4000 o/min



Slika 8. Pumpa

3.2.2. Elektromagnetski protokomjer

Proizvođač: Endress+Hauser Flowtec AG, 68700 Cernay, France

Model: CCAM18LP0920TI

Serijski broj: PB181319000

Maksimalni tlak: 16 bar

Temperatura medija: od -10 °C do 70 °C

Temperatura okoline: od -10 °C do 60 °C

Mjerno područje: 0 – 50 l/min



Slika 9. Elektromagnetski protokomjer Endress Hauser

3.2.3. Standardna mjerna prigušnica DN 25

Proizvođač: Mattech

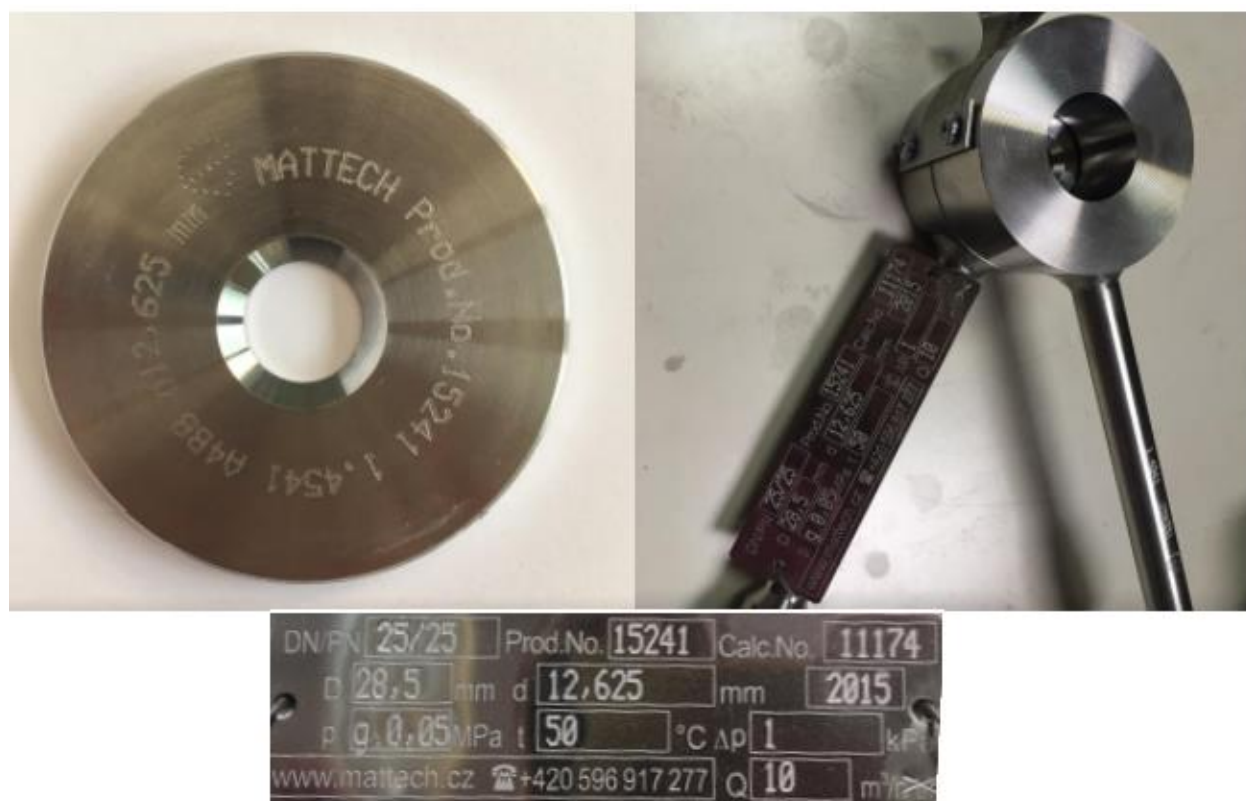
Promjer svijetlog otvora: 12,625 mm

Vanjski promjer: 28,5 mm

Maksimalna temperatura: 50 °C

Maksimalni protok: 10 m³/h

Serijski broj: 15241



Slika 10. Mjerna prigušnica DN 25

3.2.4. Nestandardne mjerne prigušnice

Dvije nestandardne mjerne prigušnice napravljene su u Laboratoriju za vodu, gorivo i mazivo. Prva prigušnica ima jedan otvor od 2 mm, a druga ima 9 otvora promjera 3 mm.



Slika 11. Mjerne prigušnice (2 mm i 9x3 mm)

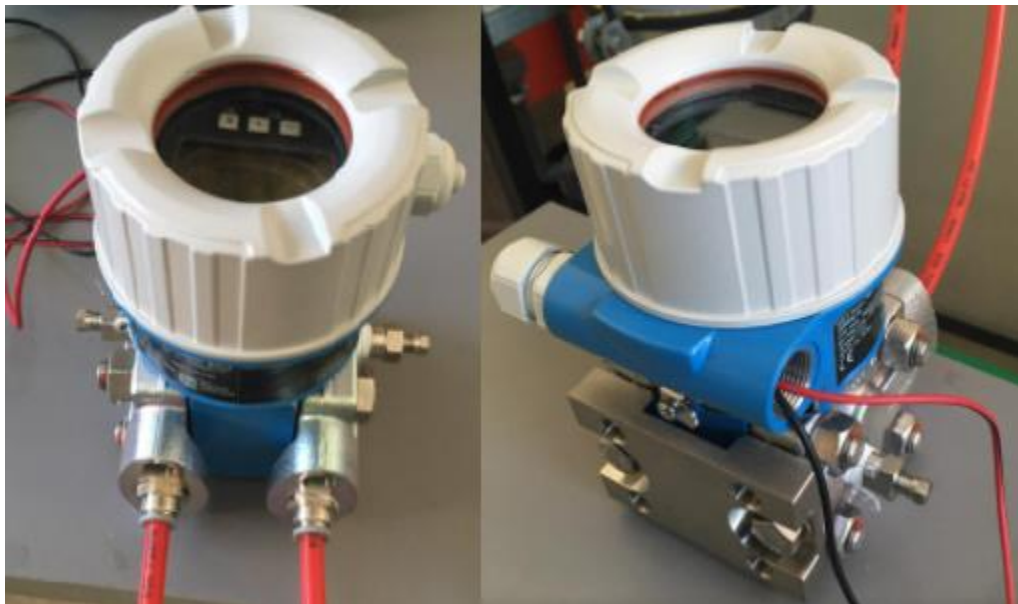
3.2.5. Diferencijalni mjerač tlaka

Proizvođač: Endress+Hauser

Model: PMD55-20ED0/0

Serijski broj: PC009301121

Mjerno područje Δp : od -16 do +16 bar



Slika 12. Diferencijalni mjerač tlaka Endress+Hauser

3.2.6. Cijevi

Proizvođač: WAVIN Ekoplastik

Model: BDS EN ISO 15874

Materijal: Polipropilen

Promjer: 32 mm



Slika 13. Cijev 32 mm

4. MJERNA NESIGURNOST

Sva mjerenja i uređaji s kojima se nešto mjeri imaju određenu mjernu nesigurnost. Iz nesigurnosti mjerenja se saznaje ponešto o kvaliteti mjerenja. Mnogi su uzroci nastanka mjerne nesigurnosti te stvarna mjerenja nikad nije moguće provesti u idealnim uvjetima. Uzroci nesigurnosti su: mjerni instrumenti, objekt mjerenja, mjerna metoda, nesigurnost umjerenih instrumenata, vještina mjerila, uzorkovanje, parametri okoline.

Bez obzira na izvor mjerne nesigurnosti one se mogu procijeniti na dva načina:

- procjene tipa A
- procjene tipa B.

Kod većine mjerenja potrebno je procijeniti pogreške oba tipa. Procjene tipa A su procjene koje koriste statistiku i one nastaju prilikom mjerenja. Te pogreške nije moguće ukloniti nego ih se može smanjiti sa povećanjem broja mjerenja ili uzoraka. Procjene tipa B baziraju se na drugim informacijama, a to su: prethodno iskustvo, vanjske umjernice, specifikacije proizvođača, razni proračuni, članci, knjige.

4.1. Procjena mjerne nesigurnosti tipa A

Kako bi se izračunala kombinirana mjerna nesigurnost mora se prvo sve svesti na standardnu mjernu nesigurnost čija je oznaka “*u*”. Za podatke dobivene statistički metodom A, standardna nesigurnost se računa iz standardne devijacije za podatke dobivene mjerenjem. Takav način obrade podataka je primjeren Gaussovoj razdiobi gdje su podaci grupirani oko srednje vrijednosti, a učestalost njihovog pojavljivanja pada odmicanjem od srednje vrijednosti.

Srednja vrijednost se računa prema:

$$\bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_{i,k} \quad [23]$$

Standardna devijacija se računa prema izrazu:

$$s(X_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (X_k - \bar{X})^2} \quad [24]$$

Standardno odstupanje srednje vrijednosti:

$$u_A = \frac{s(X_i)}{\sqrt{n}} \quad [25]$$

4.2. Procjena mjerne nesigurnosti tipa B

U slučaju da se nesigurnost računa metodom B, tada je poznat samo interval nesigurnosti u kojem će vjerovatno biti prava vrijednost, a takva se razdioba naziva pravokutna. Standardna nesigurnost za takav tip mjerenja se računa iz izraza:

$$u_B = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad [26]$$

a je polu-interval nesigurnosti.

4.3. Kombinirana mjerna nesigurnost

Nakon što se sve nesigurnosti svedu na standardnu nesigurnost izraz za kombiniranu nesigurnost je:

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad [27]$$

4.4. Koeficijenti osjetljivosti

Ako je procjena mjerene izlazne veličine y dana preko funkcijske zavisnosti o procjenama ulaznih veličina x_i :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_i) \quad [28]$$

onda se procijenjuje koliko promjena ulazne vrijednosti utječe na izlaznu vrijednost, a tome služe koeficijenti osjetljivosti. Koeficijent osjetljivosti je parcijalna derivacija izlazne vrijednosti:

$$C_i = \frac{\partial Y}{\partial X_i} \quad [29]$$

U tom slučaju se standardna nesigurnost računa prema izrazu:

$$u(y) = \sqrt{\sum_i^n (C_i \cdot u(X_i))^2} \quad [30]$$

4.5. Proširena mjerna nesigurnost

Množenjem kombinirane mjerne nesigurnosti u sa faktorom prekrivanja k dobije se proširena mjerna nesigurnost U . Faktor prekrivanja k najčešće iznosi 2. Rezultat mjerenja u tom slučaju je:

$$y \pm U(y) = y \pm k \cdot u(y) \quad [31]$$

5. MJERENJA

U sljedećim tablicama su prikazani rezultati mjerenja za sve prigušnice. Pad tlaka na svakoj prigušnici je mjeren pri dvije različite temperature. Temperaturu nije bilo moguće držati konstantnom zbog zagrijavanja prilikom prolaska kroz pumpu. Prvo su prikazani podaci izmjereni bez prigušnice kako bi se dobili protoci za pojedini stupanj rada pumpe.

Tablica 1. Protoci za mjernu liniju bez prigušnice

Bzina p.	protok	temp	Δp
-	l/min	°C	bar
1	13,65	30,0	0
2	18,43	30,0	0
3	23,02	30,0	0
4	27,04	30,0	0
5	30,60	30,1	0
6	34,20	30,3	0
7	38,42	30,4	0
8	41,83	30,8	0
9	45,33	31,3	0
10	47,70	31,6	0

Tablica 2. Standardna prigušnica DN25

Bzina p.	protok	temp	Δp	Bzina p.	protok	temp	Δp
-	l/min	°C	bar	-	l/min	°C	bar
1	13,67	23,5	0,04	1	13,63	33,5	0,04
2	18,30	23,5	0,07	2	18,25	33,5	0,07
3	22,92	23,5	0,11	3	22,84	33,5	0,11
4	27,53	23,5	0,16	4	27,40	33,5	0,16
5	32,11	23,6	0,22	5	31,94	33,5	0,22
6	36,58	23,7	0,29	6	36,45	33,6	0,29
7	41,14	23,8	0,37	7	40,90	33,6	0,37
8	45,57	24,0	0,46	8	45,40	33,7	0,46
9	49,98	24,2	0,55	9	49,78	33,9	0,55
10	54,33	24,5	0,66	10	54,10	34,1	0,66

Tablica 3. Nestandardna prigušnica 2 mm

Bzina p.	protok	temp	Δp	Bzina p.	protok	temp	Δp
-	l/min	°C	bar	-	l/min	°C	bar
1	1,660	24,4	0,71	1	1,405	32,6	0,67
2	2,342	24,4	1,25	2	2,150	32,6	1,21
3	2,785	24,4	1,98	3	2,740	32,6	1,91
4	3,202	24,2	2,87	4	3,155	32,6	2,77
5	3,635	24,2	3,91	5	3,560	32,5	3,79
6	4,040	24,4	5,10	6	3,998	32,7	4,97
7	4,440	24,5	6,44	7	4,410	32,9	6,29
8	4,850	24,7	7,91	8	4,840	33,0	7,76
9	5,290	24,9	9,50	9	5,270	33,5	9,36
10	5,710	25,3	11,23	10	5,705	33,6	11,08

Tablica 4. Nestandardna prigušnica 9x3 mm

Bzina p.	protok	temp	Δp	Bzina p.	protok	temp	Δp
-	l/min	°C	bar	-	l/min	°C	bar
1	13,10	23,0	0,10	1	12,87	31,3	0,10
2	17,42	23,0	0,19	2	17,33	31,3	0,18
3	21,80	23,0	0,29	3	21,75	31,3	0,27
4	26,20	23,0	0,41	4	26,14	31,3	0,39
5	30,55	23,0	0,56	5	30,40	31,3	0,52
6	34,92	23,0	0,71	6	34,62	31,3	0,70
7	39,21	23,0	0,91	7	38,93	31,3	0,88
8	43,44	23,2	1,10	8	43,10	31,3	1,12
9	47,60	23,4	1,31	9	47,35	31,3	1,34
10	51,56	23,7	1,54	10	51,33	31,3	1,60

6. PRORAČUNI I ANALIZA REZULTATA

6.1. Proračun protoka standardne prigušnice

Prilikom proračuna su korištene jednadžbe koje su definirane u normi ISO 5167. Prikazati će se proračun protoka za 1. stupanj rada pumpe, a na kraju će se prikazati izračunati protoci pri svim stupnjevima rada pumpe.

Jednadžba masenog protoka je:

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

Za izračun koeficijenata E i C potrebno je izračunati koeficijent β :

$$\beta = \frac{d}{D}$$

Promjeri u pogonskom stanju se računaju prema sljedećim izrazima. α je koeficijent linearnog toplinskog produljenja za materijal prigušnice i materijal cijevi. Temperatura t je temperatura medija, a temperatura t_0 je temperatura okoline koja je jednaka za sva mjerenja i iznosi 30°C.

$$d = d_0 [1 + \alpha_d (t - t_0)] = 12,625 \cdot [1 + 0,000011 \cdot (33,5 - 30)]$$

$$D = D_0 [1 + \alpha_D (t - t_0)] = 32 \cdot [1 + 0,00016 \cdot (33,5 - 30)]$$

$$d = 12,62549 \text{ mm}$$

$$D = 32,01792 \text{ mm}$$

Koeficijent β iznosi:

$$\beta = \frac{d}{D} = \frac{12,62549}{32,01792} = 0,394326$$

Gustoća se računa prema izrazu:

$$\rho = 1000 \cdot \left[1 - \frac{T + 288,9414}{508929,2 \cdot (T + 68,12963)} \cdot (T - 3,9863)^2 \right]$$

$$\rho = 1000 \cdot \left[1 - \frac{(273,15 + 33,5) + 288,9414}{508929,2 \cdot ((273,15 + 33,5) + 68,12963)} \cdot ((273,15 + 33,5) - 3,9863)^2 \right]$$

$$\rho = 999,092 \text{ kg/m}^3$$

Dinamička viskoznost se računa prema:

$$\mu = 0,0000241 \cdot 10^{\left(\frac{247,8}{T - 140}\right)}$$

$$\mu = 0,0000241 \cdot 10^{\left(\frac{247,8}{(273,15 + 33,5) - 140}\right)}$$

$$\mu = 0,000741 \text{ Pa s}$$

Koeficijent E slijedi iz:

$$E = \frac{D^2}{\sqrt{D^4 - d^4}}$$

$$E = \frac{32,01792^2}{\sqrt{32,01792^4 - 12,62549^4}}$$

$$E = 1,012313$$

Brzina za Reynoldsov broj se računa iz protoka kojeg očitamo sa elektromagnetskog protokomjera:

$$w_D = \frac{4 \cdot Q_v}{\left(\frac{D}{1000}\right)^2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot 60}$$

$$w_D = \frac{4 \cdot 13,63}{\left(\frac{32,01792}{1000}\right)^2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot 60}$$

$$w_D = 0,282142 \text{ m/s}$$

Reynoldsova značajka iznosi:

$$Re_D = \frac{w_D \cdot D \cdot \rho}{\mu}$$

$$Re_D = \frac{0,282142 \cdot 32,01792 \cdot 999,092}{0,000741}$$

$$Re_D = 12183755$$

Koeficijent A je:

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

$$A = \left(\frac{19000 \cdot 0,394326}{12183755} \right)^{0,8}$$

$$A = 0,002698$$

Jednadžba za koeficijent C je:

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

$$(0,0188 + 0,0063 \cdot A) \cdot \beta^{3,5} \cdot \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0,3}$$

$$C = 0,5961 + 0,0261 \cdot 0,394326^2 - 0,216 \cdot 0,394326^8 + 0,000521 \cdot \left(\frac{10^6 \cdot 0,394326}{12183755} \right)^{0,7} +$$

$$(0,0188 + 0,0063 \cdot 0,002698) \cdot 0,394326^{3,5} \cdot \left(\frac{10^6}{12183755} \right)^{0,3}$$

$$C = 0,600422$$

Maseni protok je:

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

$$Q_m = 0,600422 \cdot 1,012313 \cdot 1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{12,62549}{1000}\right)^2 \cdot \sqrt{2 \cdot 0,04 \cdot 10^5 \cdot 999,092}$$

$$Q_m = 0,215132 \text{ kg/s}$$

Volumni protok je:

$$Q_v = \frac{Q_m}{\rho} \cdot 1000 \cdot 60$$

$$Q_v = \frac{0,215132}{999,092} \cdot 1000 \cdot 60$$

$$Q_v = 12,92 \text{ L/min}$$

U sljedećoj tablici su dani protoci za ostale točke.

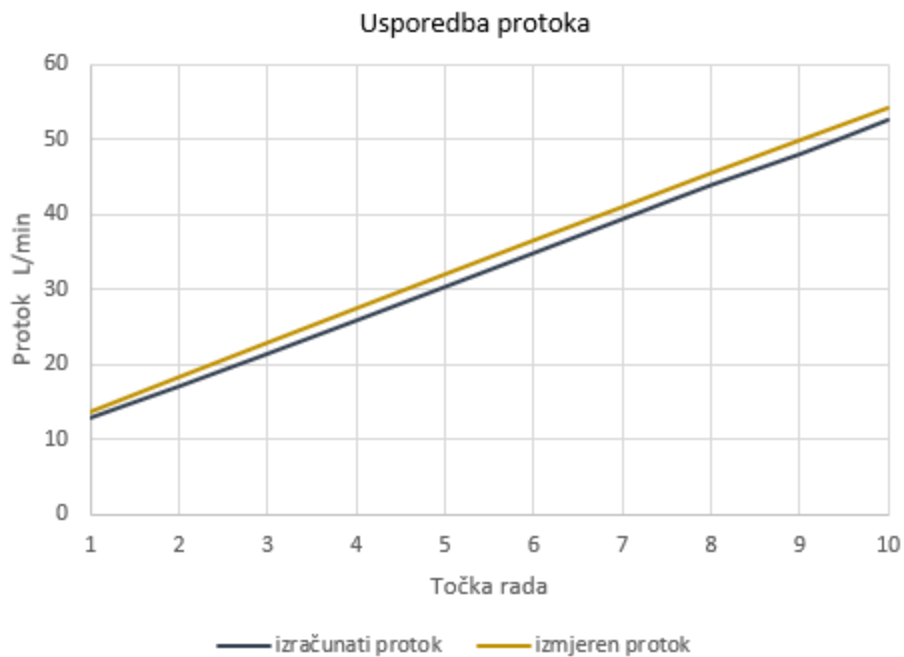
Tablica 5. Podaci za sve točke prigušnice DN 25

Brzina p.	Q_v	ϑ	Δp	d	D	ρ	β
-	l/min	°C	bar	mm	mm	kg/m ³	-
1	13,63	33,5	0,04	12,63	32,02	999,1	0,394
2	18,25	33,5	0,07	12,63	32,02	999,1	0,394
3	22,84	33,5	0,11	12,63	32,02	999,1	0,394
4	27,40	33,5	0,16	12,63	32,02	999,1	0,394
5	31,94	33,5	0,22	12,63	32,02	999,1	0,394
6	36,45	33,6	0,29	12,63	32,02	999,1	0,394
7	40,90	33,6	0,37	12,63	32,02	999,1	0,394
8	45,40	33,7	0,46	12,63	32,02	999,1	0,394
9	49,78	33,9	0,55	12,63	32,02	999,1	0,394
10	54,10	34,1	0,66	12,63	32,02	999,1	0,394

Brzina p.	E	W_D	μ	Re_D	A	C	Q_m
-	-	m/s	Pa s	-	-	-	kg/s
1	1,0123	0,282	0,000741	12183755	0,0026	0,60042	0,215
2	1,0123	0,377	0,000741	16313539	0,0021	0,60038	0,284
3	1,0123	0,472	0,000741	20416505	0,0017	0,60035	0,356
4	1,0123	0,567	0,000741	24492655	0,0015	0,60033	0,430

5	1,0123	0,661	0,000741	28550927	0,0013	0,60032	0,504
6	1,0123	0,754	0,000739	32648822	0,0012	0,60031	0,579
7	1,0123	0,846	0,000739	36634756	0,0011	0,60030	0,654
8	1,0123	0,939	0,000738	40748296	0,0010	0,60029	0,729
9	1,0123	1,030	0,000735	44861369	0,0009	0,60028	0,797
10	1,0123	1,119	0,000732	48952477	0,0008	0,60027	0,873

Bzina p.	ϑ	Q_v	Q_v	Razlika
-	-	izračunato	izmjereno	
-	°C	l/min	l/min	%
1	33,5	12,92	13,63	5,2
2	33,5	17,09	18,25	6,4
3	33,5	21,42	22,84	6,2
4	33,5	25,84	27,4	5,7
5	33,5	30,29	31,94	5,2
6	33,6	34,78	36,45	4,6
7	33,6	39,29	40,9	3,9
8	33,7	43,80	45,4	3,5
9	33,9	47,90	49,78	3,8
10	34,1	52,47	54,1	3,0



Slika 14. Usporedba protoka prigušnice DN 25 pri višoj temperaturi

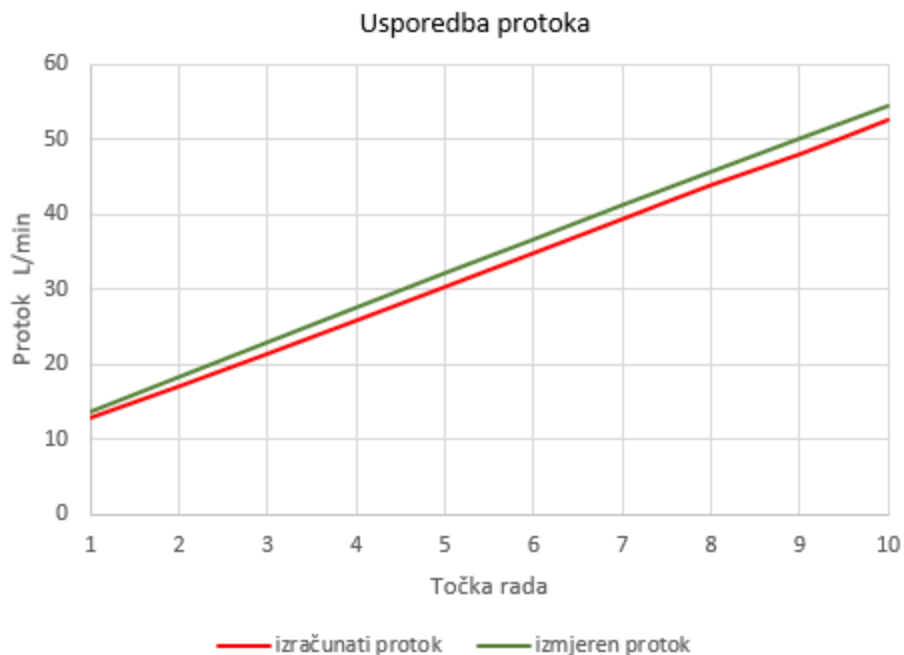
Rezultati za mjerenje pri počejoj temperaturi 23,5 °C prikazani su u sljedećoj tablici.

Tablica 6. Rezlutati pri nižoj temperaturi prigušnice DN 25

Bzina p.	protok	ϑ	Δp	d	D	ρ	β
-	l/min	°C	bar	mm	mm	kg/m ³	-
1	13,67	23,5	0,04	12,62	31,97	999,11	0,394
2	18,30	23,5	0,07	12,62	31,97	999,11	0,394
3	22,92	23,5	0,11	12,62	31,97	999,11	0,394
4	27,53	23,5	0,16	12,62	31,97	999,11	0,394
5	32,11	23,6	0,22	12,62	31,97	999,11	0,394
6	36,58	23,7	0,29	12,62	31,97	999,11	0,394
7	41,14	23,8	0,37	12,62	31,97	999,11	0,394
8	45,57	24,0	0,46	12,62	31,97	999,11	0,394
9	49,98	24,2	0,55	12,62	31,97	999,11	0,394
10	54,33	24,5	0,66	12,62	31,97	999,11	0,394

Bzina p.	E	W_D	μ	Re_D	A	C	Q_m
-	-	m/s	Pa s	-	-	-	kg/s
1	1,0124	0,283	0,000922	9836415	0,0032	0,60046	0,215
2	1,0124	0,380	0,000922	13167988	0,0025	0,60042	0,284
3	1,0124	0,475	0,000922	16492365	0,0021	0,60039	0,356
4	1,0124	0,571	0,000922	19809547	0,0018	0,60037	0,430
5	1,0124	0,666	0,00092	23158517	0,0016	0,60035	0,504
6	1,0124	0,759	0,000917	26443259	0,0014	0,60034	0,579
7	1,0124	0,854	0,000915	29808155	0,0013	0,60033	0,654
8	1,0124	0,946	0,000911	33169971	0,0012	0,60032	0,729
9	1,0124	1,037	0,000907	36547060	0,0011	0,60031	0,797
10	1,0124	1,127	0,000901	40001067	0,0010	0,60030	0,873

Bzina p.	ϑ	Q_v	Q_v	Razlika
-	-	izračunato	izmjereno	-
-	°C	l/min	l/min	%
1	23,5	12,92	13,67	5,5
2	23,5	17,09	18,3	6,6
3	23,5	21,42	22,92	6,5
4	23,5	25,83	27,53	6,2
5	23,6	30,29	32,11	5,7
6	23,7	34,78	36,58	4,9
7	23,8	39,28	41,14	4,5
8	24,0	43,80	45,57	3,9
9	24,2	47,89	49,98	4,2
10	24,5	52,46	54,33	3,4



Slika 15. Usporedba protoka prigušnice DN 25 pri nižoj temperaturi

6.2. Usporedba protoka standardne prigušnice

Najveća razlika protoka elektromagnetskog protokomjera i standardne mjerne prigušnice DN 25 je u radnoj točki 2 za obje temperature. Pri temperaturi 23,5 °C iznosi 6,6 %, a pri temperaturi 33,5 °C iznosi 6,4 %. U sljedećoj tablici je prikazana usporedba izračunatih protoka na različitim temperaturama.

Tablica 7. Usporedba izračunatih ptoroka pri različitim temperaturama

Bzina p.	θ	Q _v	θ	Q _v
-	-	izračunato	-	izračunato
-	°C	l/min	°C	l/min
1	23,5	12,92	33,5	12,92
2	23,5	17,09	33,5	17,09
3	23,5	21,42	33,5	21,42
4	23,5	25,83	33,5	25,84
5	23,6	30,29	33,5	30,29
6	23,7	34,78	33,6	34,78
7	23,8	39,28	33,6	39,29
8	24,0	43,80	33,7	43,80
9	24,2	47,89	33,9	47,90
10	24,5	52,46	34,1	52,47

Iz podataka se vidi da su protoci identični te da temperature ne utječe u velikoj mjeri na protok.

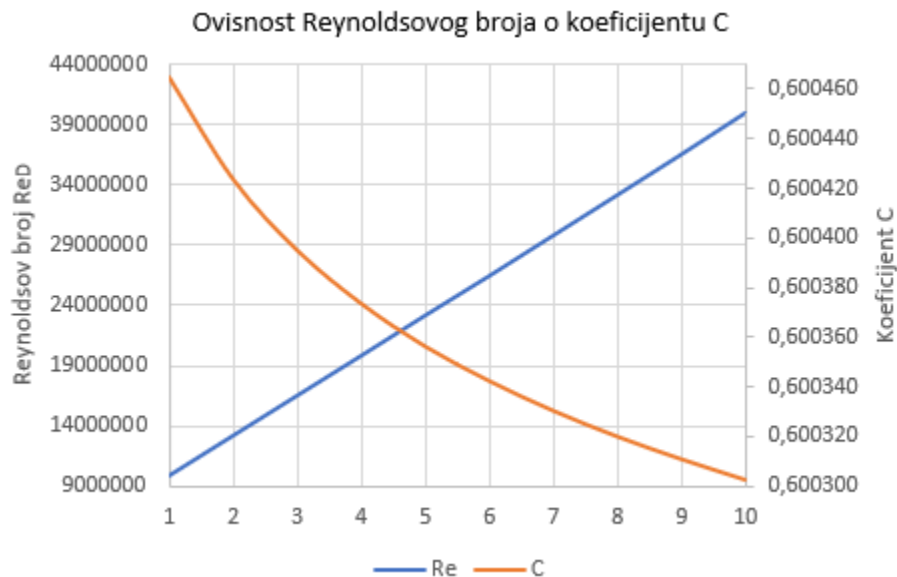
U sljedećoj tablici je prikazana usporedba očitanih protoka elektromagnetskog protokomjera pri različitim temperaturama.

Tablica 8. Usporedba izmjerenih protoka pri različitim temperaturama

Bzina p.	θ	Q _v	θ	Q _v	Razlika
-	-	izmjereno	-	izmjereno	-
-	°C	l/min	°C	l/min	%
1	23,5	13,67	33,5	13,63	0,29
2	23,5	18,30	33,5	18,25	0,27
3	23,5	22,92	33,5	22,84	0,35
4	23,5	27,53	33,5	27,40	0,47
5	23,6	32,11	33,5	31,94	0,53
6	23,7	36,58	33,6	36,45	0,36
7	23,8	41,14	33,6	40,90	0,58
8	24,0	45,57	33,7	45,40	0,37
9	24,2	49,98	33,9	49,78	0,40
10	24,5	54,33	34,1	54,10	0,42

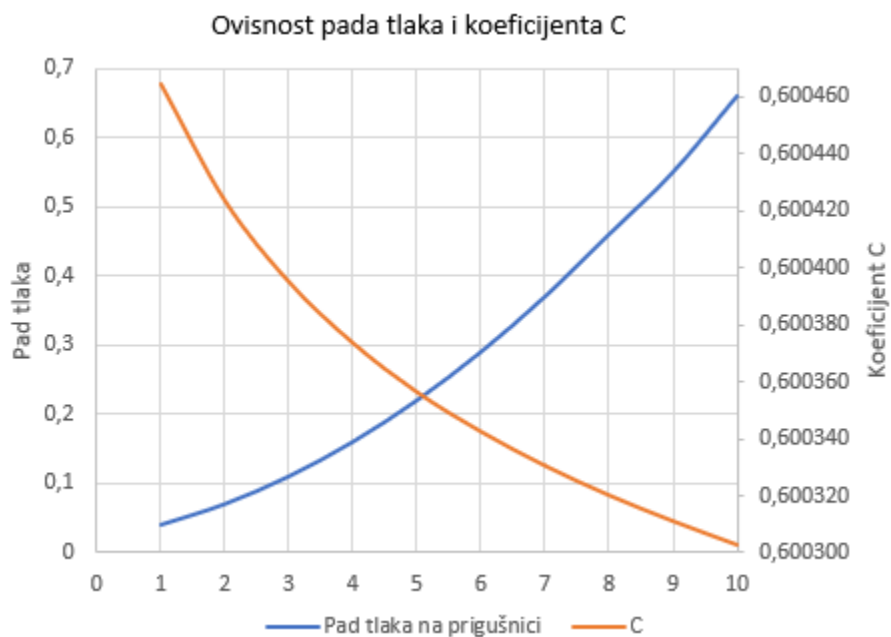
Iz prethodne tablice se vidi da se očitani protoci ne razlikuju znatno te se ta razlika može pridodati očitavanju prilikom mjerenja zbog osciliranja protoka.

Na slici je prikazana ovisnost Reynoldsovog broja Re_D i koeficijenta C .



Slika 16. Ovisnost Reynoldsovog broja Re_D i koeficijenta C prigušnice DN 25

Na sljedećoj slici je prikazana ovisnost pada tlaka i koeficijenta C .



Slika 17. Ovisnost pada tlaka Δp o koeficijentu C prigušnice DN 25

6.3. Usporedba protoka nestandardnih prigušnica

Na isti način kao kod standardne prigušnice su izračunati protoci za dvije nestandardne prigušnice. Podaci za sve točke su dani u sljedećim tablicama.

6.3.1. Nestandardna prigušnica $d = 2 \text{ mm}$

Ova nestandardna prigušnica je napravljena u Laboratoriju za vodu, gorivo i mazivo Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Zanimljiva pojava koja se događala prilikom mjerenja je kavitacija. Ova prigušnica je ostvarila jako velike padove tlaka i zbog toga je dolazilo do kavitacije. U sljedećoj tablici su prikazani podaci za nestandardnu prigušnicu $d = 2 \text{ mm}$.

Tablica 9. Podaci za nestandardnu prigušnicu $d = 2 \text{ mm}$ za višu temperaturu

Bzina p.	protok	ϑ	Δp	d	D	ρ	β
-	l/min	°C	bar	mm	mm	kg/m ³	-
1	1,405	32,6	0,67	2,00	32,01	999,1	0,062
2	2,150	32,6	1,21	2,00	32,01	999,1	0,062
3	2,740	32,6	1,91	2,00	32,01	999,1	0,062
4	3,155	32,6	2,77	2,00	32,01	999,1	0,062
5	3,560	32,5	3,79	2,00	32,01	999,1	0,062
6	3,998	32,7	4,97	2,00	32,01	999,1	0,062
7	4,410	32,9	6,29	2,00	32,01	999,1	0,062
8	4,840	33,0	7,76	2,00	32,01	999,1	0,062
9	5,270	33,5	9,36	2,00	32,01	999,1	0,062
10	5,705	33,6	11,08	2,00	32,01	999,1	0,062

Bzina p.	E	W_D	μ	Re_D	A	C	Q_m
-	-	m/s	Pa s	-	-	-	kg/s
1	1,000	0,029	0,00075	1232966	0,0038	0,59627	0,021
2	1,000	0,044	0,00075	1886745	0,0027	0,59625	0,029
3	1,000	0,056	0,00075	2404503	0,0022	0,59624	0,036
4	1,000	0,065	0,00075	2768689	0,0020	0,59624	0,044
5	1,000	0,073	0,00076	3117664	0,0018	0,59624	0,051
6	1,000	0,082	0,00075	3515701	0,0016	0,59623	0,059
7	1,000	0,091	0,00075	3893976	0,0015	0,59623	0,066
8	1,000	0,100	0,00075	4282439	0,0014	0,59623	0,073
9	1,000	0,109	0,00074	4710814	0,0013	0,59623	0,081
10	1,000	0,118	0,00074	5110056	0,0012	0,59623	0,088

Bzina p.	ϑ	Q_v	Q_v	Razlika
-	-	izračunato	izmjereno	-
-	°C	l/min	l/min	%
1	32,6	1,30	1,405	7,4
2	32,6	1,75	2,150	18,6
3	32,6	2,20	2,740	19,8
4	32,6	2,65	3,155	16,1
5	32,5	3,10	3,560	13,0
6	32,7	3,55	3,998	11,3
7	32,9	3,99	4,410	9,6
8	33,0	4,43	4,840	8,5
9	33,5	4,87	5,270	7,7
10	33,6	5,29	5,705	7,2

U sljedećoj tablici su podaci za nestandardnu prigušnicu $d = 2$ mm pri nižoj temperaturi medija.

Tablica 10. Podaci za nestandardnu prigušnicu $d = 2$ mm pri nižoj temperaturi

Bzina p.	protok	ϑ	Δp	d	D	ρ	β
-	l/min	°C	bar	mm	mm	kg/m ³	-
1	1,660	24,4	0,71	2,00	31,9713	999,112	0,062
2	2,342	24,4	1,25	2,00	31,9713	999,112	0,062
3	2,785	24,4	1,98	2,00	31,97	999,1	0,062
4	3,202	24,2	2,87	2,00	31,97	999,1	0,062
5	3,635	24,2	3,91	2,00	31,97	999,1	0,062
6	4,040	24,4	5,10	2,00	31,97	999,1	0,062
7	4,440	24,5	6,44	2,00	31,97	999,1	0,062
8	4,850	24,7	7,91	2,00	31,97	999,1	0,062
9	5,290	24,9	9,50	2,00	31,97	999,1	0,062
10	5,710	25,3	11,23	2,00	31,97	999,1	0,062

Bzina p.	E	W_D	μ	Re_D	A	C	Q_m
-	-	m/s	Pa s	-	-	-	kg/s
1	1,00001	0,034	0,00090	1219409	0,0039	0,59627	0,022
2	1,00001	0,043	0,00090	1720395	0,0029	0,59625	0,029
3	1,00001	0,057	0,00090	2045815	0,0025	0,59625	0,037
4	1,00001	0,066	0,00091	2341410	0,0023	0,59624	0,044
5	1,00001	0,075	0,00091	2658034	0,0020	0,59624	0,052
6	1,00001	0,083	0,00090	2967718	0,0019	0,59624	0,059
7	1,00001	0,092	0,00090	3268999	0,0017	0,59624	0,067
8	1,00001	0,101	0,00090	3587163	0,0016	0,59623	0,074
9	1,00001	0,109	0,00089	3930406	0,0015	0,59623	0,081
10	1,00001	0,118	0,00088	4281024	0,0014	0,59623	0,088

Bzina p.	θ	Q _v	Q _v	Razlika
-	-	izračunato	izmjereno	-
-	°C	l/min	l/min	%
1	24,4	1,34	1,660	19,3
2	24,4	1,78	2,342	24,1
3	24,4	2,24	2,785	19,7
4	24,2	2,69	3,202	15,9
5	24,2	3,14	3,635	13,5
6	24,4	3,59	4,040	11,1
7	24,5	4,04	4,440	9,1
8	24,7	4,47	4,850	7,8
9	24,9	4,90	5,290	7,3
10	25,3	5,33	5,710	6,7

Najveća razlika protoka je u 2. točki mjerenja pri nižoj temperaturi i iznosi 24.1 %. Također, u svim točkama mjerenja su prilično velike razlike izmjerenog i izračunatog protoka pomoću proračuna za standardnu prigušnicu.

6.3.2. Nestandardna prigušnica $d = 9 \times 3 \text{ mm}$

Ova nestandardna prigušnica je također napravljena u Laboratoriju za vodu, gorivo i mazivo Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Potrebno je bilo izračunati ekvivalentni promjer d_{ekv} jer prigušnica sadrži 9 rupa po 3 mm.

Ukupna površina svih prolaza na prigušnici je:

$$A = 9 \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4} = \frac{d_{ekv}^2 \cdot \pi}{4}$$

$$A = 9 \cdot \frac{3^2 \cdot \pi}{4} = 63,61725 \text{ mm}^2$$

Iz čega slijedi:

$$d_{\text{ekv}} = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}}$$

$$d_{\text{ekv}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 63,61725}{\pi}} = 9 \text{ mm}$$

U sljedećoj tablici su prikazani podaci za nestandardnu prigušnicu 9x3 mm mjereni pri višoj temperaturi.

Tablica 11. Podaci za nestandardnu prigušnicu 9x3 mm mjereni pri višoj temperaturi.

Bzina p.	protok	θ	Δp	d	D	ρ	β
-	l/min	°C	bar	mm	mm	kg/m ³	-
1	12,87	31,3	0,10	9,00	32,01	999,1	0,281
2	17,33	31,3	0,18	9,00	32,01	999,1	0,281
3	21,75	31,3	0,27	9,00	32,01	999,1	0,281
4	26,14	31,3	0,39	9,00	32,01	999,1	0,281
5	30,40	31,3	0,52	9,00	32,01	999,1	0,281
6	34,62	31,3	0,70	9,00	32,01	999,1	0,281
7	38,93	31,3	0,88	9,00	32,01	999,1	0,281
8	43,10	31,3	1,12	9,00	32,01	999,1	0,281
9	47,35	31,3	1,34	9,00	32,01	999,1	0,281
10	51,33	31,3	1,60	9,00	32,01	999,1	0,281

Bzina p.	E	W_D	μ	Re_D	A	C	Q_m
-	-	m/s	Pa s	-	-	-	kg/s
1	1,0031	0,266	0,000775	10993260	0,0022	0,598303	0,170
2	1,0031	0,358	0,000775	14802890	0,0017	0,598287	0,228
3	1,0031	0,450	0,000775	18578353	0,0014	0,598275	0,280
4	1,0031	0,541	0,000775	22328191	0,0012	0,598267	0,337
5	1,0031	0,629	0,000775	25966986	0,0011	0,598261	0,389
6	1,0031	0,717	0,000775	29571614	0,0010	0,598256	0,451
7	1,0031	0,806	0,000775	33253117	0,0009	0,598251	0,506
8	1,0031	0,892	0,000775	36815036	0,0008	0,598248	0,571
9	1,0031	0,980	0,000775	40445289	0,000788	0,598244	0,624
10	1,0031	1,063	0,000775	43844914	0,000739	0,598242	0,682

Bzina p.	ϑ	Q_v	Q_v	Razlika
-	-	izračunato	izmjereno	-
-	°C	l/min	l/min	%
1	31,3	10,25	12,87	20,4
2	31,3	13,75	17,33	20,6
3	31,3	16,84	21,75	22,6
4	31,3	20,24	26,14	22,6
5	31,3	23,37	30,4	23,1
6	31,3	27,12	34,62	21,7
7	31,3	30,40	38,93	21,9
8	31,3	34,30	43,1	20,4
9	31,3	37,52	47,35	20,8
10	31,3	41,00	51,33	20,1

U sljedećoj tablici su prikazani podaci za nižu temperaturu.

Tablica 12. Podaci za nestandardnu prigušnicu 9x3 mm mjereni pri nižoj temperaturi.

Bzina p.	protok	ϑ	Δp	d	D	ρ	β
-	l/min	°C	bar	mm	mm	kg/m ³	-
1	13,10	23,0	0,1	9,00	31,96	999,1	0,281
2	17,42	23,0	0,19	9,00	31,96	999,1	0,281
3	21,80	23,0	0,29	9,00	31,96	999,1	0,281
4	26,20	23,0	0,41	9,00	31,96	999,1	0,281
5	30,55	23,0	0,56	9,00	31,96	999,1	0,281
6	34,92	23,0	0,71	9,00	31,96	999,1	0,281
7	39,21	23,0	0,91	9,00	31,96	999,1	0,281
8	43,44	23,2	1,1	9,00	31,96	999,1	0,281
9	47,60	23,4	1,31	9,00	31,96	999,1	0,281
10	51,56	23,7	1,54	9,00	31,96	999,1	0,281

Bzina p.	E	W_D	μ	Re_D	A	C	Q_m
-	-	m/s	Pa s	-	-	-	kg/s
1	1,0031	0,272	0,00093	9317720	0,0025	0,59832	0,170
2	1,0031	0,361	0,00093	12390434	0,0020	0,5983	0,235
3	1,0031	0,452	0,00093	15505824	0,0017	0,59829	0,290
4	1,0031	0,544	0,00093	18635440	0,0014	0,59828	0,345
5	1,0031	0,634	0,00093	21729492	0,00130	0,59827	0,403
6	1,0031	0,725	0,00093	24837770	0,00117	0,59827	0,454
7	1,0031	0,814	0,00093	27889145	0,00106	0,59826	0,514
8	1,0031	0,902	0,00093	31041597	0,00098	0,59826	0,565
9	1,0031	0,988	0,00092	34172116	0,00090	0,59826	0,617
10	1,0031	1,071	0,00092	37272127	0,00084	0,59825	0,669

Bzina p.	ϑ	Q_v	Q_v	Razlika
-	-	izračunato	izmjereno	-
-	°C	l/min	l/min	%
1	23,0	10,25	13,10	21,8
2	23,0	14,13	17,42	18,9
3	23,0	17,45	21,80	19,9
4	23,0	20,75	26,20	20,8
5	23,0	24,25	30,55	20,6
6	23,0	27,31	34,92	21,8
7	23,0	30,91	39,21	21,2
8	23,2	33,99	43,44	21,8
9	23,4	37,09	47,60	22,1
10	23,7	40,21	51,56	22,0

Pri višoj temperaturi je najmanja razlika između izračunatog i izmjerenog protoka 20,1 %, a najveća 23,1 %. Pri nižoj temperaturi te razlike iznose 18,9 % i 22,1 %.

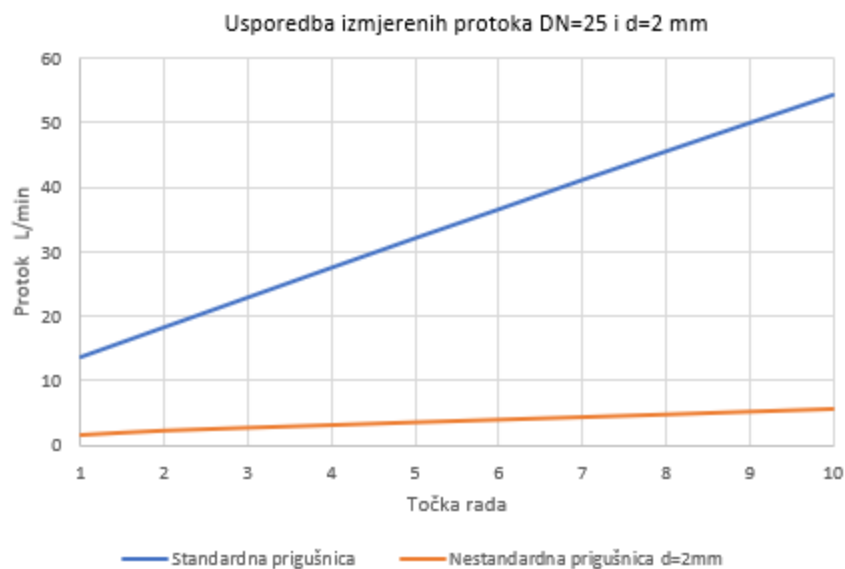
6.3.3. Usporedba standardne i nestandardne prigušnice $d = 2 \text{ mm}$

U sljedećoj tablici su prikazani izračunati protoci i njihove razlike za obje prigušnice.

Tablica 13. Usporedba izračunatih protoka prigušnica DN 25 i $d=2 \text{ mm}$

Bzina p.	Standardna prigušnica DN 25		Nestandardna prigušnica $d = 2 \text{ mm}$		Razlika
	ϑ	Q_v	ϑ	Q_v	
-	-	izračunato	-	izračunato	-
-	$^{\circ}\text{C}$	l/min	$^{\circ}\text{C}$	l/min	%
1	23,5	12,92	24,4	1,34	89,6
2	23,5	17,09	24,4	1,78	89,6
3	23,5	21,42	24,4	2,24	89,6
4	23,5	25,83	24,2	2,69	89,6
5	23,6	30,29	24,2	3,14	89,6
6	23,7	34,78	24,4	3,59	89,7
7	23,8	39,28	24,5	4,04	89,7
8	24,0	43,80	24,7	4,47	89,8
9	24,2	47,89	24,9	4,90	89,8
10	24,5	52,46	25,3	5,33	89,8

Na sljedećem dijagramu su prikazani izmjereni protoci na elektromagnetskom protokomjeru za obje prigušnice.



Slika 18. Usporedba izmjerenih protoka prigušnice DN 25 i d=2mm

6.3.4. Usporedba standardne i nestandardne prigušnice d = 9x3 mm

U sljedećoj tablici su prikazani izračunati protoci i njihove razlike za obje prigušnice.

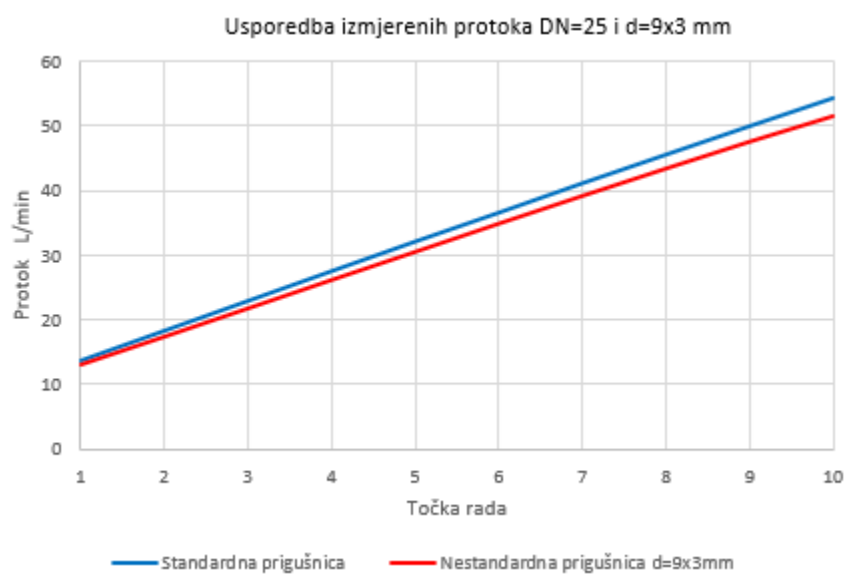
Tablica 14. Usporedba izračunatih protoka prigušnica DN 25 i d=9x3 mm

	Standardna prigušnica DN 25		Nestandardna prigušnica d = 9x3 mm		
Bzina p.	θ	Q _v	θ	Q _v	Razlika
-	-	izračunato	-	izračunato	-
-	°C	l/min	°C	l/min	%
1	23,5	12,92	23,0	10,25	20,7
2	23,5	17,09	23,0	14,13	17,3
3	23,5	21,42	23,0	17,45	18,5
4	23,5	25,83	23,0	20,75	19,7
5	23,6	30,29	23,0	24,25	19,9
6	23,7	34,78	23,0	27,31	21,5
7	23,8	39,28	23,0	30,91	21,3
8	24,0	43,80	23,2	33,99	22,4
9	24,2	47,89	23,4	37,09	22,6

10	24,5	52,46	23,7	40,21	23,3
----	------	-------	------	-------	------

U ovoj tablici se razlike kreću od 17,3 % do 23,3 %, a u prethodnoj tablici se razlike kreću u rasponu od 89,6 % do 89,8 %.

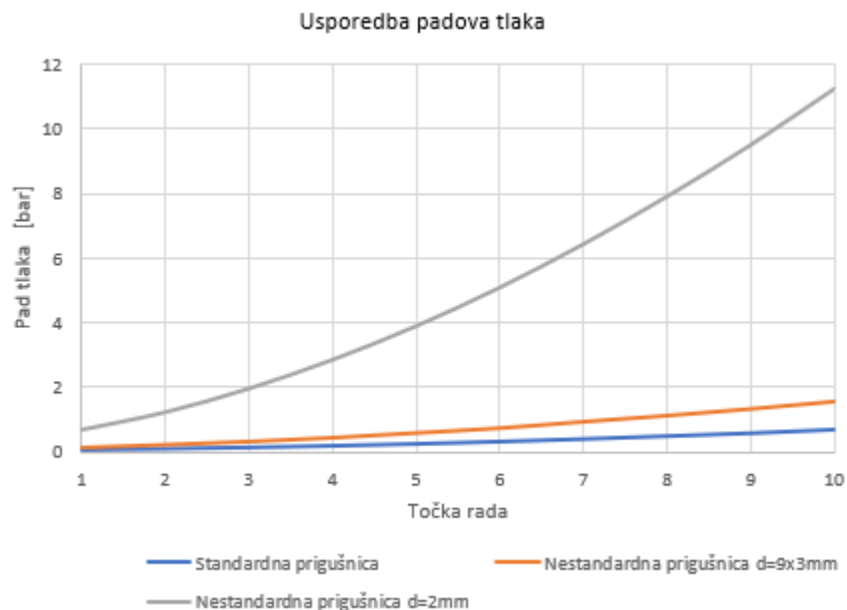
Na sljedećem dijagramu su prikazani izmjereni protoci na elektromagnetskom protokomjeru za obje prigušnice.



Slika 19. Usporedba izmjerenih protoka prigušnice DN 25 i d=9x3 mm

6.4. Usporedba svih prigušnica

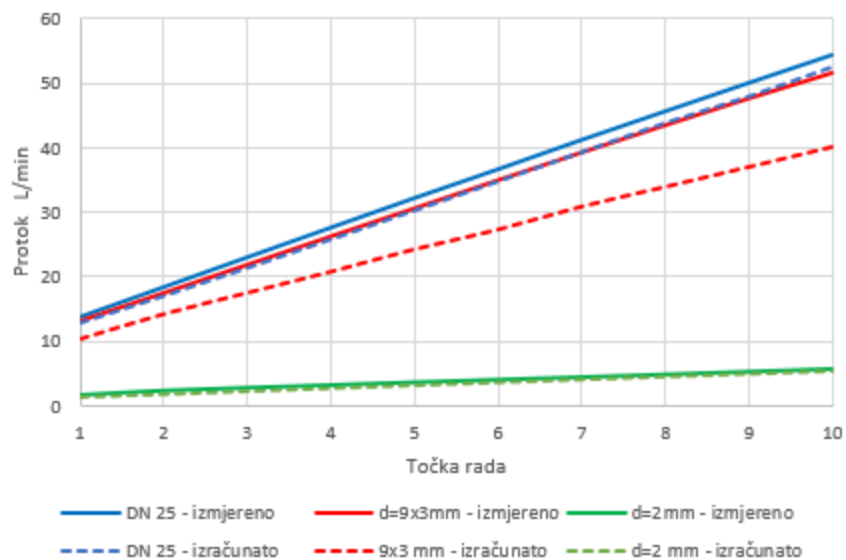
Na sljedećem dijagramu su prikazani padovi tlaka Δp svih triju prigušnica.



Slika 20. Usporedba padova tlaka svih prigušnica

Iz dijagrama se može zaključiti zašto kod prigušnice $d = 2\text{ mm}$ dolazi do kavitacije. U svakoj točki pad tlaka je za red veličine veći kod prigušnice $d = 2\text{ mm}$ u odnosu na ostale prigušnice. Razlog tako velikom padu tlaka je jako mala površina kroz koju struji medij kroz prigušnicu.

Na sljedećem dijagramu su prikazani očitani i izmjereni protoci za sve tri prigušnice.



Slika 21. Usporedba izmjerenih i izračunatih protoka svih prigušnica

Najveći protok u mjernoj liniji se ostvari kroz standardnu prigušnicu, a najmanji kroz nestandardnu prigušnicu 2 mm. Najveća razlika između izmjerenog i izračunatog protoka je kod nestandardne prigušnice s 9 rupa.

7. PRORAČUN MJERNE NESIGURNOSTI

Proračun mjerne nesigurnosti nikad nije jednostavan zbog velikog broja faktora koji utječu na konačan rezultat. U ovom radu prikazan je jednostavan proračun gdje je većina nesigurnosti uzeta iz slobodne procjene. Na mjernu nesigurnost utječu svi članovi koji se nalaze u jednadžbi za proračun protoka. Grešku za očitavanje pada tlaka na prigušnici propisuje proizvođač diferencijalnog mjerača tlaka Endress+Hauser i iznosi 0,1 % očitavanja. Greške prilikom očitavanja pada tlaka nema jer podatak o padu tlaka nije oscilirao prilikom očitavanja. Sljedeća nesigurnost se tiče gustoće koja ovisi o temperaturi vode koja se koristi kao medij. Ostale nesigurnosti su: površina unutarnjeg promjera prigušnice, faktor E i koeficijent C . Faktor E ovisi o promjeru cijevi i promjeru prigušnice te njihovom omjeru β . Koeficijent C ovisi o koeficijentu β i Reynoldsovom broju koji se računa pomoću brzine izračunate iz protoka koji je očitao sa elektromagnetskog protokomjera. Sve mjerne nesigurnosti su dijeljene sa faktorom razdiobe i množene koeficijentom osjetljivosti te se na taj način dobije standardno odstupanje.

7.1. Mjerna nesigurnost prigušnice

Koeficijent osjetljivosti za razliku tlaka je:

$$\frac{\partial Q_m}{\partial \Delta p} = C \cdot E \cdot d^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p}}$$

Koeficijent osjetljivosti gustoće je:

$$\frac{\partial Q_m}{\partial \rho} = C \cdot E \cdot d^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p}}$$

Koeficijent osjetljivosti površine je:

$$\frac{\partial Q_m}{\partial A} = C \cdot E \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p}$$

Koeficijent osjetljivosti za koeficijent C se računa prema jednadžbi:

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

Koeficijent osjetljivosti za koeficijent E je:

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

Promjer d se uvrštava u metrima, gustoća ρ u kg/m^3 , a Δp u paskalima.

Ukupno standardno odstupanje protoka se računa prema:

$$u_{\text{uk}} = \sqrt{(u_{\Delta p})^2 + (u_{\rho})^2 + (u_A)^2 + (u_C)^2 + (u_E)^2}$$

U sljedećim tablicama su prikazane mjerne nesigurnosti za svih 10 točaka mjerenih sa standardnom prigušnicom DN 25 pri početnoj temperaturi vode 23,5 °C.

Tablica 15. Mjerna nesigurnost u točki 1

	Izvor nesigurnosti	Mjerna nesigurnost	Faktor razdiobe	Koeficijent osjetljivosti	Standardno odstupanje
Δp	specifikacije	4	1,732	1,346E-08	3,1E-08
ρ	sl. procjena	0,001	1,732	1,346E-08	7,8E-12
A	sl. procjena	0,0000001	1,732	1718,65	9,9E-05
C	sl. procjena	0,0001	1,732	0,358253	2,1E-05
E	sl. procjena	0,0001	1,732	0,212486	1,3E-05
Ukupna mjerna nesigurnost [kg/s]					0,0001
Proširena mjerna nesigurnost ($k = 2$) [kg/s]					0,0002
Proširena mjerna nesigurnost ($k = 2$) [L/min]					0,012

Tablica 16. Mjerna nesigurnost u točki 2

	Izvor nesigurnosti	Mjerna nesigurnost	Faktor razdiobe	Koeficijent osjetljivosti	Standardno odstupanje
Δp	specifikacije	7	1,732	1,017E-08	4,1E-08
ρ	sl. procjena	0,001	1,732	1,017E-08	5,8E-12
A	sl. procjena	0,0000001	1,732	2273,40	1,3E-04
C	sl. procjena	0,0001	1,732	0,473924	2,7E-05
E	sl. procjena	0,0001	1,732	0,281073	1,6E-05
Ukupna mjerna nesigurnost [kg/s]					0,00013
Proširena mjerna nesigurnost ($k = 2$) [kg/s]					0,00026
Proširena mjerna nesigurnost ($k = 2$) [L/min]					0,016

Tablica 17. Mjerna nesigurnost u točki 3

	Izvor nesigurnosti	Mjerna nesigurnost	Faktor razdiobe	Koeficijent osjetljivosti	Standardno odstupanje
Δp	specifikacije	11	1,732	8,114E-09	5,1E-08
ρ	sl. procjena	0,001	1,732	8,114E-09	4,6E-12
A	sl. procjena	0,0000001	1,732	2849,72	1,6E-04
C	sl. procjena	0,0001	1,732	0,594096	3,4E-05
E	sl. procjena	0,0001	1,732	0,352328	2,1E-05
Ukupna mjerna nesigurnost [kg/s]					0,00017
Proširena mjerna nesigurnost ($k = 2$) [kg/s]					0,00034
Proširena mjerna nesigurnost ($k = 2$) [L/min]					0,02

Tablica 18. Mjerna nesigurnost u točki 4

	Izvor nesigurnosti	Mjerna nesigurnost	Faktor razdiobe	Koeficijent osjetljivosti	Standardno odstupanje
Δp	specifikacije	16	1,732	6,727E-09	6,2E-08
ρ	sl. procjena	0,001	1,732	6,727E-09	3,8E-12
A	sl. procjena	0,0000001	1,732	3436,77	1,9E-04
C	sl. procjena	0,0001	1,732	0,716506	4,1E-05
E	sl. procjena	0,0001	1,732	0,424908	2,4E-05
Ukupna mjerna nesigurnost [kg/s]					0,00021
Proširena mjerna nesigurnost ($k = 2$) [kg/s]					0,00041
Proširena mjerna nesigurnost ($k = 2$) [L/min]					0,025

Tablica 19. Mjerna nesigurnost u točki 5

	Izvor nesigurnosti	Mjerna nesigurnost	Faktor razdiobe	Koeficijent osjetljivosti	Standardno odstupanje
Δp	specifikacije	22	1,732	5,737E-09	7,3E-08
ρ	sl. procjena	0,001	1,732	5,737E-09	3,3E-12
A	sl. procjena	0,0000001	1,732	4029,86	2,3E-04
C	sl. procjena	0,0001	1,732	0,840179	4,8E-05
E	sl. procjena	0,0001	1,732	0,498235	2,8E-05
Ukupna mjerna nesigurnost [kg/s]					0,00024
Proširena mjerna nesigurnost ($k = 2$) [kg/s]					0,00048
Proširena mjerna nesigurnost ($k = 2$) [L/min]					0,029

Tablica 20. Mjerna nesigurnost u točki 6

	Izvor nesigurnosti	Mjerna nesigurnost	Faktor razdiobe	Koeficijent osjetljivosti	Standardno odstupanje
Δp	specifikacije	29	1,732	4,997E-09	8,4E-08
ρ	sl. procjena	0,001	1,732	4,997E-09	2,9E-12
A	sl. procjena	0,0000001	1,732	4626,65	2,7E-04
C	sl. procjena	0,0001	1,732	0,964629	5,7E-05
E	sl. procjena	0,0001	1,732	0,572022	3,3E-05
Ukupna mjerna nesigurnost [kg/s]					0,00027
Proširena mjerna nesigurnost ($k = 2$) [kg/s]					0,00054
Proširena mjerna nesigurnost ($k = 2$) [L/min]					0,033

Tablica 21. Mjerna nesigurnost u točki 7

	Izvor nesigurnosti	Mjerna nesigurnost	Faktor razdiobe	Koeficijent osjetljivosti	Standardno odstupanje
Δp	specifikacije	37	1,732	4,424E-09	9,5E-08
ρ	sl. procjena	0,001	1,732	4,424E-09	2,5E-12
A	sl. procjena	0,0000001	1,732	5225,88	3,1E-04
C	sl. procjena	0,0001	1,732	1,089589	6,3E-05
E	sl. procjena	0,0001	1,732	0,646111	3,7E-05
Ukupna mjerna nesigurnost [kg/s]					0,00031
Proširena mjerna nesigurnost ($k = 2$) [kg/s]					0,00062
Proširena mjerna nesigurnost ($k = 2$) [L/min]					0,037

Tablica 22. Mjerna nesigurnost u točki 8

	Izvor nesigurnosti	Mjerna nesigurnost	Faktor razdiobe	Koeficijent osjetljivosti	Standardno odstupanje
Δp	specifikacije	46	1,732	3,967E-09	1,1E-07
ρ	sl. procjena	0,001	1,732	3,967E-09	2,3E-12
A	sl. procjena	0,0000001	1,732	5826,79	3,7E-04
C	sl. procjena	0,0001	1,732	1,214904	7,0E-05
E	sl. procjena	0,0001	1,732	0,720410	4,2E-05
Ukupna mjerna nesigurnost [kg/s]					0,00035
Proširena mjerna nesigurnost ($k = 2$) [kg/s]					0,0007
Proširena mjerna nesigurnost ($k = 2$) [L/min]					0,041

Tablica 23. Mjerna nesigurnost u točki 9

	Izvor nesigurnosti	Mjerna nesigurnost	Faktor razdiobe	Koeficijent osjetljivosti	Standardno odstupanje
Δp	specifikacije	55	1,732	3,628E-09	1,2E-07
ρ	sl. procjena	0,001	1,732	3,628E-09	2,1E-12
A	sl. procjena	0,0000001	1,732	6371,25	3,7E-04
C	sl. procjena	0,0001	1,732	1,328451	7,7 -05
E	sl. procjena	0,0001	1,732	0,787730	4,5E-05
Ukupna mjerna nesigurnost [kg/s]					0,00037
Proširena mjerna nesigurnost ($k = 2$) [kg/s]					0,00074
Proširena mjerna nesigurnost ($k = 2$) [L/min]					0,045

Tablica 24. Mjerna nesigurnost u točki 10

	Izvor nesigurnosti	Mjerna nesigurnost	Faktor razdiobe	Koeficijent osjetljivosti	Standardno odstupanje
Δp	specifikacije	66	1,732	3,312E-09	1,2E-07
ρ	sl. procjena	0,001	1,732	3,312E-09	1,9E-12
A	sl. procjena	0,0000001	1,732	6979,24	4,0E-04
C	sl. procjena	0,0001	1,732	1,455251	8,4E-05
E	sl. procjena	0,0001	1,732	0,862908	4,9E-05
Ukupna mjerna nesigurnost [kg/s]					0,00041
Proširena mjerna nesigurnost ($k = 2$) [kg/s]					0,00082
Proširena mjerna nesigurnost ($k = 2$) [L/min]					0,05

Iz zadnje tablice se vidi da mjerna nesigurnost u zadnjem mjerenju iznosi približno 0,05 L/min. Iako je proračun pojednostavljen greška je zanemarivo mala.

7.2. Mjerna nesigurnost elektromagnetskog protokomjera

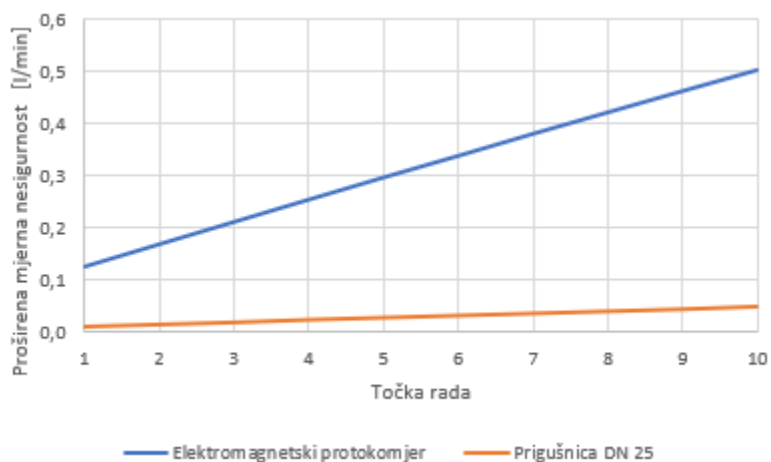
U specifikacijama elektromagnetskog protokomjera se nalazi podatak da maksimalna pogreška iznosi 0,8 % prikazanog protoka. Najveća pogreška će biti u desetom stupnju rada pumpe. U sljedećoj tablici je prikazan proračun mjerne nesigurnosti elektromagnetskog protokomjera u svih deset točaka rada pumpe.

Tablica 25. Mjerne nesigurnosti elektromagnetskog protokomjera

Stupanj rada pumpe	Očitani protok [l/min]	Mjerna nesigurnost	Faktor razdiobe	Koeficijent osjetljivosti	Standardna nesigurnost	Proširena mjerna nesigurnost (k=2) [l/min]
1.	13,67	0,109	1,732	1	0,063	0,126
2.	18,30	0,146	1,732	1	0,085	0,169
3.	22,92	0,183	1,732	1	0,106	0,212
4.	27,53	0,220	1,732	1	0,127	0,254
5.	32,11	0,257	1,732	1	0,148	0,297
6.	36,58	0,293	1,732	1	0,169	0,338
7.	41,14	0,329	1,732	1	0,190	0,380
8.	45,57	0,365	1,732	1	0,210	0,421
9.	49,98	0,400	1,732	1	0,231	0,462
10.	54,33	0,435	1,732	1	0,251	0,502

7.3. Usporedba mjernih nesigurnosti

U sljedećem dijagramu je prikazana usporedba mjernih nesigurnosti.

**Slika 22.** Usporedba mjernih nesigurnosti

Iz dijagrama se vidi da su mjerne nesigurnosti elektromagnetskog protokomjera za red veličine veće od mjernih nesigurnosti kod prigušnice. Najveća mjerna nesigurnost iznosi 0,5 l/min u desetom stupnju rada pumpe.

8. ZAKLJUČAK

Mjerenje bilo koje fizikalne veličine je točnije ako se mjeri sa više različitih mjernih uređaja, a u ovom slučaju su to mjerna prigušnica i elektromagnetski protokomjer. Mjerenje protoka pomoću standardne mjerne prigušnice zahtijeva više posla jer se mjeri temperatura i pad tlaka na prigušnici, a nakon toga slijedi proračun protoka koji je prikazan u radu. Sva mjerenja su provedena pri dvije različite temperature kako bi se pokazalo da se rezultati ne razlikuju znatno. Razlog tomu je taj što se voda smatra nestlačivom te joj se gustoća i dinamička vizkoznost ne mijenjaju znatno sa promjenom temperature. Mjerenja su provedena u 10 točaka koje obuhvaćaju cijelo radno područje pumpe. Prilikom korištenja standardne mjerne prigušnice DN 25, izračunati i izmjereni protoci se najviše razlikuju na drugom stupnju rada pumpe. Ta razlika iznosi 6,6 %.

Nakon toga je pokazano kako isti proračun za standardnu mjernu prigušnicu ne daje dobre rezultate kad se koriste nestandardne mjerne prigušnice. U ovom radu su korištene dvije nestandardne mjerne prigušnice od kojih prva ima jedan otvor od 2 mm, a druga devet otvora od 3 mm. Na kraju rada izračunate su mjerne nesigurnosti za prigušnicu i elektromagnetski protokomjer te je pokazano da su mjerne nesigurnosti protokomjera za red veličine veće od onih kod prigušnice.

LITERATURA

- [1] Endress Hauser, *Flow Handbook*, 2006.
- [2] D. zvizdić, L. Grgec-Bermanec, *Predavanja iz kolegija toplinska i procesna mjerenja*, 2009./2010.
- [3] B. Halasz, A. Galović, I. Boras, *Toplinske tablice*, FSB Zagreb, 2017.
- [4] International standard, ISO 5167-1, *Measurment of fluid by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full, Part 1: General principles and requirements*
- [5] International standard, ISO 5167-2, *Measurment of fluid by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full, Part 2: Orifice plates*
- [6] Kraut, B., *Strojarski priručnik*, Sajema d.o.o. Zagreb, 2009.