

Mjerenje protoka svježeg i otpadnog zraka u ispitnim kabinama za motore s unutarnjim izgaranjem

Posilović, Martina

Undergraduate thesis / Završni rad

2012

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:235:095164>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-29**

Repository / Repozitorij:

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



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Martina Posilović
0035169149

Zagreb, 2012.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

Mjerenje protoka svježeg i otpadnog zraka u ispitnim kabinama za motore s unutarnjim izgaranjem

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Lulić

Student:

Martina Posilović

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

Zahvaljujem se cijenjenom mentoru prof. dr. sc. Zoranu Luliću, koji me vodio i davao mi smjernice tokom izrade ovog rada, svim zaposlenicima Katedre za motore i vozila koji su mi pomogli oko praktičnog dijela rada te doc.dr.sc.Lovorki Grgec Bermanec sa Katedre za toplinsku i procesnu tehniku koja mi je stavila na raspolaganje literaturu i mjernu opremu te mi svojim savjetima pomogla u izradi rada.

Zahvaljujem se svojim roditeljima što su mi omogućili studij.

Zahvaljujem se svojim prijateljima i cijeloj obitelji na podršci.

Martina Posilović

Sadržaj

Popis slika	II
Popis tablica	III
1. Uvod.....	1
2. Načini mjerenja protoka plinovitih tvari.....	2
2.1 Mjerenje protoka pomoću cijevi sa suženjem	3
2.2 <i>Mjerni uređajii na principu mjerenja brzine fluide</i>	8
2.3 Mjerenje protoka vrtloženjem.....	14
2.4 Mjerila protoka s turbinom.....	15
2.5 Kroskorelacijska metoda mjerenja.....	16
2.6 Volumetrijska metoda mjerenja protoka	17
2.7 Anemometri s ugrijanom žicom	19
2.8 Kalorimetrijska metoda mjernja	20
3. Opis stanja	22
4. Mjerenje protoka zraka u laboratoriju	24
5. Mjerna nesigurnost	33
6. Zaključak.....	34
Literatura.....	35

Popis slika

<i>Slika 2.1. Strujanje fluida kroz mjernu prigušnicu</i>	<i>3</i>
<i>Slika 2.2. a) mjerna prigušnica, b) mjerna mlaznica c) Venturijeva cijev</i>	<i>5</i>
<i>Slika 2.3. Mjerna prigušnica, izrađena od pažljivo obrađenih i probušenih pločica koncentrično postavljenih između dvije prirubnice</i>	<i>6</i>
<i>Slika 2.4. Venturijeva cijev</i>	<i>7</i>
<i>Slika 2.5. Mjerna mlaznica</i>	<i>8</i>
<i>Slika 2.6. Krivulje pada tlaka za mjernu prigušnicu, mjernu mlaznicu i Venturijevu cijev</i>	<i>8</i>
<i>Slika 2.7. Pitotova cijev, shematski prikaz principa mjerenja</i>	<i>9</i>
<i>Slika 2.8. Pitotova cijev, uređaj</i>	<i>10</i>
<i>Slika 2.9. Shematski prikaz načela mjerenja protoka rotametrom</i>	<i>11</i>
<i>Slika 2.10. Laboratorijski rotametri</i>	<i>13</i>
<i>Slika 2.11. Mjesto vrtloženja iza nepomičnog objekta Ova mjerila imaju točnost unutar 1%. Ne koriste se za vrlo viskozne tekućine</i>	<i>14</i>
<i>Slika 2.13. Konstrukcija tipičnog uređaja za mjerenje protoka vrtloženjem</i>	<i>15</i>
<i>Slika 2.14. Shematski prikaz mjernog uređaja s turbinom</i>	<i>15</i>
<i>Slika 2.15. Djelomični presjek mjerila protoka s rotorom</i>	<i>16</i>
<i>Slika 2.17. Shematski prikaz kroskorelacijske metode mjerenja</i>	<i>17</i>
<i>Slika 2.19. Shematski prikaz uređaja za volumetrijsko mjerenje protoka sa rotirajućim klipovima</i>	<i>18</i>
<i>Slika 2.21. Shematski prikaz principa anemometarskog osjetila s ugrijanom žicom</i>	<i>19</i>
<i>Slika 2.22. Heat transfer flowmeter</i>	<i>20</i>
<i>Slika 2.24. Promjena temperature kroz mjerilo protoka</i>	<i>21</i>
<i>Slika 2.26. Kalorimetrijsko mjerilo za vanjskim senzorima i grijačem</i>	<i>21</i>
<i>Slika 4.1. Shema spajanja komponenata mjernog uređaja</i>	<i>24</i>
<i>Slika 4.2. Digitalni anemometar PEAK TECH 5060</i>	<i>25</i>
<i>Slika 4.3. Prandtl-Pitotova cijev vanjskog promjera Ø 6 mm</i>	<i>25</i>
<i>Slika 4.4. Prandtl-Pitotova cijev sa oznakama</i>	<i>26</i>
<i>Slika 4.5. Osjetnik diferencijalnog tlaka marke GE Druck, model LPX 9381</i>	<i>26</i>
<i>Slika 4.6. Ispravljač s regulacijom napona i struje</i>	<i>27</i>
<i>Slika 4.7. Mjerenje na izlaznoj cijevi</i>	<i>27</i>
<i>Slika 4.8. Mjerenje na izlaznoj cijevi</i>	<i>28</i>
<i>Slika 4.9. Priprema za mjerenje na ulaznoj cijevi</i>	<i>28</i>
<i>Slika 4.10. Mjerenje na ulaznoj cijevi</i>	<i>29</i>
<i>Slika 4.11. Mjerenje na ulaznoj cijevi</i>	<i>29</i>
<i>Slika 4.12. Mjerna oprema na mjestu mjerenja</i>	<i>30</i>

Popis tablica

<i>Tablica 4.1. Rezultati mjerenja za odvodnu cijev u mjernoj jedinici Pa.....</i>	<i>31</i>
<i>Tablica 4.2. Rezultati mjerenja za dovodnu cijev u mjernoj jedinici Pa.....</i>	<i>31</i>

Popis oznaka

A, m^2	- površina poprečnog presjeka
C_D	- koeficijent pražnjenja
$c, \text{J}/(\text{kg K})$	- specifični toplinski kapacitet
d, m	- promjer cijevi
F_G, N	- težina ronila
F_T, N	- sila fluida na ronilo
F_u, N	- sila uzgona
$f,$	- frekvencija Karmanovih vrtloga
f_T	- faktor trenja između tekućine i ronila
$G_h, \text{kg/h}$	- satna potrošnja goriva
$g, \text{m/s}^2$	- ubrzanje sile teže
$g_e, \text{g/kWh}$	- efektivna potrošnja goriva
m, kg	- masa
n, s^{-1}	- brzina vrtnje
P_e, W	- efektivna snaga motora
$P_{koč}, \text{W}$	- maksimalna snaga kočnice
p, Pa	- tlak
$Q, \text{m}^3/\text{s}$	- volumenski protok
$Q_{hl}, \text{m}^3/\text{s}$	- volumenski protok zraka za hlađenje motora
$Q_{izl}, \text{m}^3/\text{s}$	- volumenski protok zraka u izlaznoj cijevi
$Q_{ul}, \text{m}^3/\text{s}$	- volumenski protok zraka u ulaznoj cijevi
$Q_{izg}, \text{m}^3/\text{s}$	- volumenski protok zraka za izgaranje
$Q_m, \text{kg/s}$	- maseni protok
$q_v, \text{m}^3/\text{kWh}$	- specifični volumenski protok zraka
$R, \text{J}/(\text{kg K})$	- plinska konstanta
Re	- Reynoldsov broj
S_R, m^2	- površina ronila
S_t	- Strouhalova konstanta
T, K	- termodinamička temperatura
V, m^3	- volumen
V_R, m^3	- volumen ronila
$v, \text{m/s}$	- brzina strujanja
$v_{sr}, \text{m/s}$	- srednja brzina strujanja

Z_h , kg/h	- količina zraka po satu
Z_0 , kg _Z /kg _G	- stehiometrijska količina zraka za izgaranje
β	- omjer suženja cijevi
ρ , kg/ m ³	- gustoća
η	- koeficijent viskoznosti

1. Uvod

Kako bi se tijekom ispitivanja motora s unutarnjim izgaranjem (MSUI) na motornoj kočnici osigurali kvalitetni rezultati mjerenja potrebno je u ispitnu kabinu posebnim ventilacijskim sustavom dobiti određenu količinu svježeg zraka. Isto tako, nakon izgaranja u motoru i ispiranja ostalog zraka u kabini iz kabine treba odvesti ispušne plinove i otpadni zrak.

Da bi se moglo upravljati s količinom svježeg zraka koji ulazi u prostoriju ventilacijskim sustavom potrebno je mjeriti protok dovoda svježeg zraka i odvoda ispušnih plinova.

Pokušaji za mjerenje protoka fluida vrlo su stari. Još su stari Egipćani pomoću mjernih brana mjerili protok vode u kanalima za navodnjavanje. I Rimljani su u vrijeme Cezara mjerili potrošnju vode jednom vrstom blende. Sve su to, naravno, bile iskustvene metode. Tek je u 18. stoljeću švicarski matematičar Johann Bernoulli postavio teorijske osnove na kojima se bazira nekoliko suvremenih metoda mjerenja protoka fluida.

S obzirom na ekonomsku i tehnološku važnost mjerenja protoka, postojala je potreba za usavršavanjem starih i pronalaženjem novih metoda mjerenja. Do danas je razvijen velik broj postupaka i uređaja. Procjenjuje se da na svjetskom tržištu postoji najmanje 100 tipova mjernih uređaja, a novi se svakodnevno pojavljuju.

U ovom radu će biti spomenuti i opisani najvažniji principi mjerenja protoka fluida koji su primjenjivi za mjerenje dovoda svježeg zraka te odvoda ispušnih plinova i otpadnog zraka iz ispitne kabine MSUI.

2. Načini mjerenja protoka plinovitih tvari

Osnovno što je potrebno znati kada se govori o protoku fluida je razlika između volumenskog i masenog protoka. Volumenski protok (Q) je volumen fluida koji prođe kroz neku površinu u jedinici vremena (m^3/s). Maseni protok ($\dot{m}$) je masa fluida koja prođe kroz neku površinu u jedinici vremena (kg/s). Ako nam je poznata gustoća fluida (ρ) tada maseni i volumenski protok možemo međusobno povezati prema izrazu:

$$\frac{V}{m} = \rho \quad (2.1)$$

U ovom radu će biti prikazani principi mjerenja volumenskog protoka.

Volumenski protok može se najopćenitije izraziti kao integral brzine uzdužnog strujanja po diferencijalu površine poprečnog presjeka.

Neka je zadana površina A fluida koji struji kroz nju brzinom v pod kutom α od normale na površinu A , volumenski protok iznosi:

$$Q = A \cdot v \cdot \cos \alpha \quad (2.2)$$

U specijalnom slučaju gdje je protok fluida okomit na površinu ($\alpha=0$), volumenski protok iznosi:

$$Q = A \cdot v \quad (2.3)$$

Ako brzina kroz površinu nije jednolika ili površina nije ravna, tada se protok može izračunati pomoću površinskog integrala:

$$Q = \iint_S v dS \quad (2.4)$$

gdje dS diferencijal površine opisan sa:

$$dS = n dA \quad (2.5)$$

sa n kao jediničnim vektorom površinske normale i dA diferencijal površine.

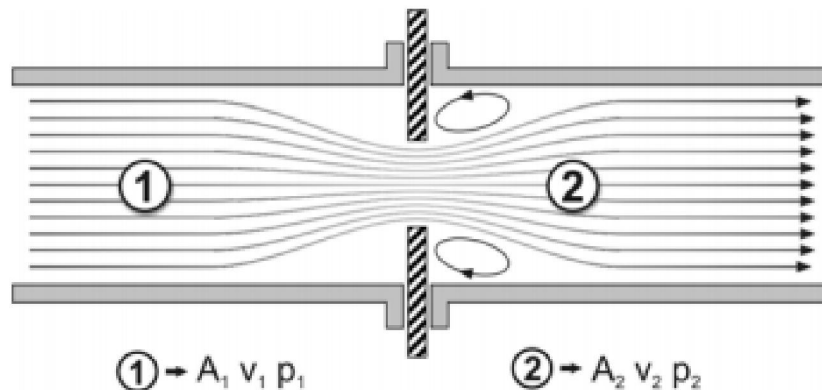
Izvedbe mjerila protoka fluida:

- mjerenje protoka pomoću cijevi sa suženjem,
- mjerenje protoka vrtloženjem (turbulencijom),
- mjerilo protoka plovkom (rotametar),
- mjerilo protoka s turbinom,
- elektroindukcijska metoda mjerenja protoka,
- ultrazvučne metode mjerenja protoka,
- kroskorelacijska metoda mjerenja protoka,
- volumetrijske metode mjerenja protoka,
- kalorimetrijska metoda mjerenja protoka,
- anemometri s ugrižanom žicom,
- anemometar s lopaticama.

2.1 Mjerenje protoka pomoću cijevi sa suženjem

Ako se neki prigušni element ugradi u cjevovod, on će na tom mjestu prouzrokovati lokalno ubrzanje struje, odnosno smanjenje tlaka zbog suženja poprečnog presjeka. Nastala razlika tlakova mjeri se senzorima razlike tlaka.

Pri prolasku realnog fluida kroz otvor, uslijed velikog gradijenta tlaka nastaju vrtlozi ispred i iza suženja. Neposredno ispred suženja (zbog zaustavljanja tekućine) dolazi do manjeg porasta tlaka koji zatim brzo opada i na određenoj udaljenosti iza zaslona dostiže minimalnu vrijednost. Na tom mjestu se postavlja mjerilo tlaka p_2 .



Slika Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..1. Strujanje fluida kroz mjernu prigušnicu

Postavimo li Bernoullijevu jednadžbu strujanja za idealni fluid:

$$p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{konst.} \quad (2.6)$$

dobijemo:

$$p_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (2.7)$$

Uz pretpostavku:

$$h_1 = h_2$$

Gdje su h_1 i h_2 piezometričke visine.

Jednadžba kontinuiteta:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (2.8)$$

Uvrštavanjem jednadžbe kontinuiteta (2.8) u (2.7) i sređivanjem

$$v_1^2 = \frac{2}{\rho} (p_1 - p_2) \left(\frac{A_2}{A_1} + v_1^2 \right)^2 \quad (2.9)$$

$$v_1^2 \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] = \frac{2}{\rho} (p_1 - p_2) \quad (2.10)$$

Dobivamo izraz za određivanje srednje brzine strujanja medija nakon mjesta smanjenja površine poprečnog presjeka:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}} \quad (2.11)$$

Ako je

$$\frac{A_2}{A_1} = 1$$

nazivnik u jednadžbi (2.11) biti će jednak nuli te se preko jednadžbe (2.3) dolazi do konačnog izraza za izračun volumenskog protoka:

$$Q = K \sqrt{p_1 - p_2} \quad (2.12)$$

Budući da je presjek mlaza na mjestu mjerenja p_2 različit od otvora zaslona A_2 , uvodi se korekcijski faktor:

C_D - koeficijent pražnjenja ili koeficijent kontrakcije mlaza, koji ovisi prvenstveno o:

- omjeru suženja cijevi

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

- Reynoldsovom broju

$$R_e = \frac{d \rho v}{\eta}$$

gdje je:

ρ = gustoća

v = brzina strujanja

η = koeficijent viskoznosti

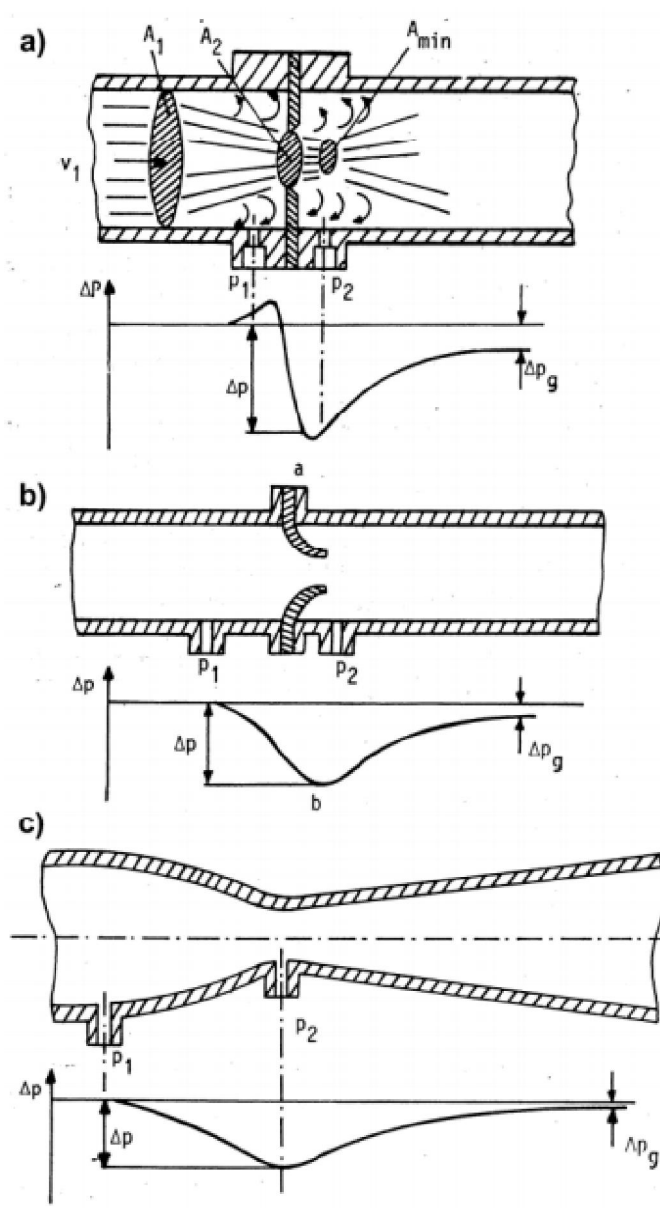
Korekcijski faktor se određuje eksperimentalno za različite oblike cijevi i promjere poprečnih presjeka.

Stvarni protok jednak je:

$$Q_s = C_D Q \quad (2.13)$$

Najznačajniji predstavnici mjernih uređaja koji rade na principu diferencijalnog tlaka su :

- mjerna prigušnica
- mjerna mlaznica
- Venturijeva cijev



Slika **Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..2.** a) mjerna prigušnica, b) mjerna mlaznica c) Venturijeva cijev

Mjerna prigušnica (engl. *Orifice plate*) je tanka ploča sa otvorom, kružnog oblika i koncentrična s osi cjevovoda. Standardne mjerne prigušnice su tanke ploče sa oštrom ivicom. Debljina ploče je mala u odnosu na poprečni presjek. Površine moraju biti paralelne i ravne.

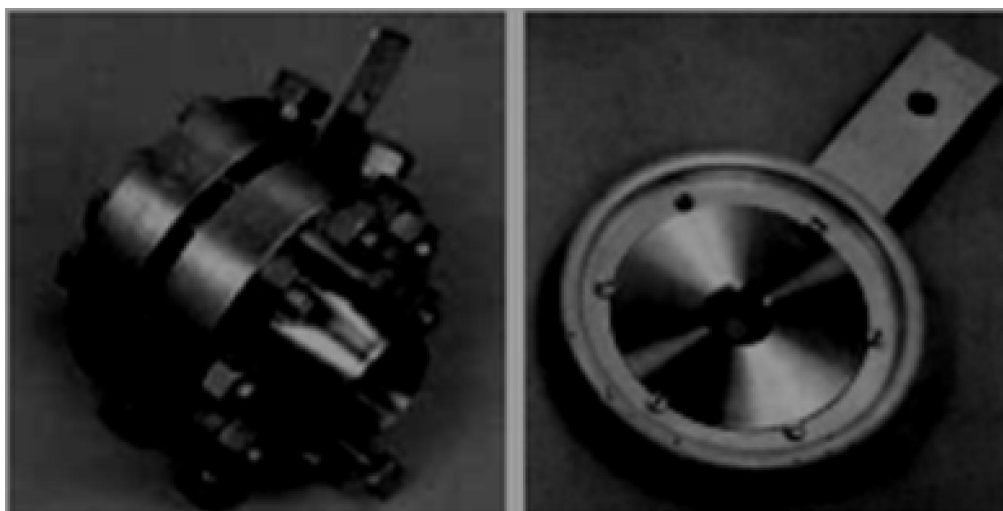
Ulazna ivica otvora prigušnice mora biti oštra, a smatra se takvom ako njen radijus nije veći od 0.0004 d. princip rada i montaže su isti. Montaža je vrlo jednostavna uz pomoć prirubnica. Na taj način mjernu prigušnicu možemo zamijeniti nekim drugim mjerilom različitog iznosa omjera β .

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

Mjerila protoka sa prigušnicama se koriste pri:

$$0.2 \leq \beta \leq 0.75$$

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



Slika Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..3. Mjerna prigušnica, izrađena od pažljivo obrađenih i probušenih pločica koncentrično postavljениh između dvije prirubnice

Prednosti ovog načina mjerenja su jednostavnost montaže, jednostavna primjena, relativno niska cijena i fleksibilnost. Upravo zato je ovo danas i najčešći način mjerenja protoka fluida. Međutim, glavni nedostatak je visoki nepovratni gubitak energije zbog turbulencija oko prigušnice što u slučaju većih protoka predstavlja ekonomske gubitke.

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

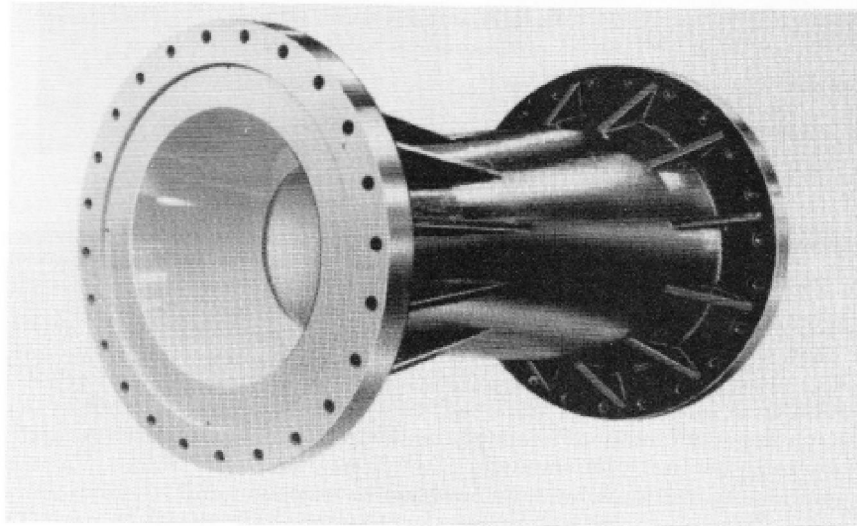
Venturijeva cijev za zadani omjer suženja cijevi β daje najmanji diferencijal tlaka Δp pa se primjenjuje kada se zahtjeva mali trajni gubitak tlaka. Također je pogodna za mjerenje protoka fluida koji sadrže čvrste čestice.

Skraćena klasična Venturijeva cijev je cijev kod koje je izlazni promjer divergentnog dijela manji od promjera D . Divergentni dio se može skratiti za oko 35% dužine, bez već promjene gubitka tlaka u uređaju.

Venturijeve cijevi se primjenjuju pri:

$$0.4 \leq \beta \leq 0.75$$

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



Slika Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..4. Venturijeva cijev

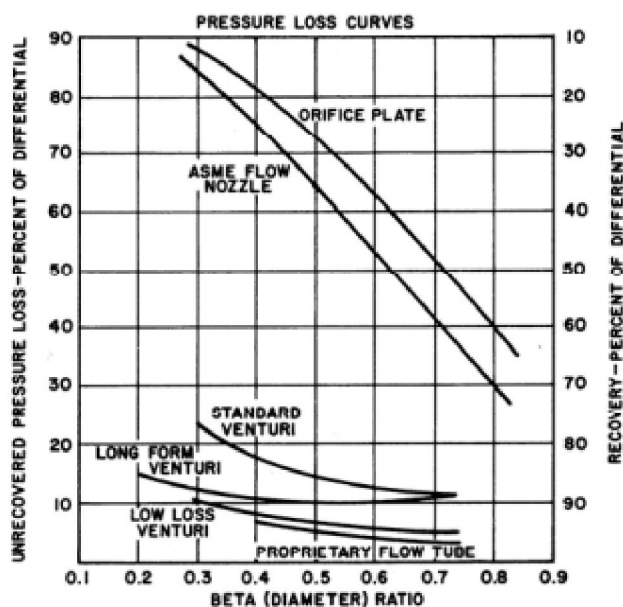
Ograničenja za širu upotrebu Venturijevih cijevi su i visoka cijena, skupa izrada i velika dužina.

Mjerne mlaznice (engl. *Flow nozzle*) je uređaj koji se sastoji od konvergentnog ulaznog dijela produženog u cilindrični suženje koje se naziva grlo. Priključci za mjerenje tlaka su obično smješteni na ulaznom promjeru mlaznice i na grlu ili malo udaljeno od grla prema vanjskom promjeru. Kod mjernih uređaja za mjerenje a protoka sa mlaznicom turbulenciju nastaju samo iza suženja. Diferencijalni tlak Δp je manji nego kod prigušnice.

Koristi se tamo gdje je Venturijeva cijev predugačka i gdje erozija ili kavitacija onemogućavaju upotrebu mjerne prigušnice.



Slika Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..5. Mjerna mlaznica

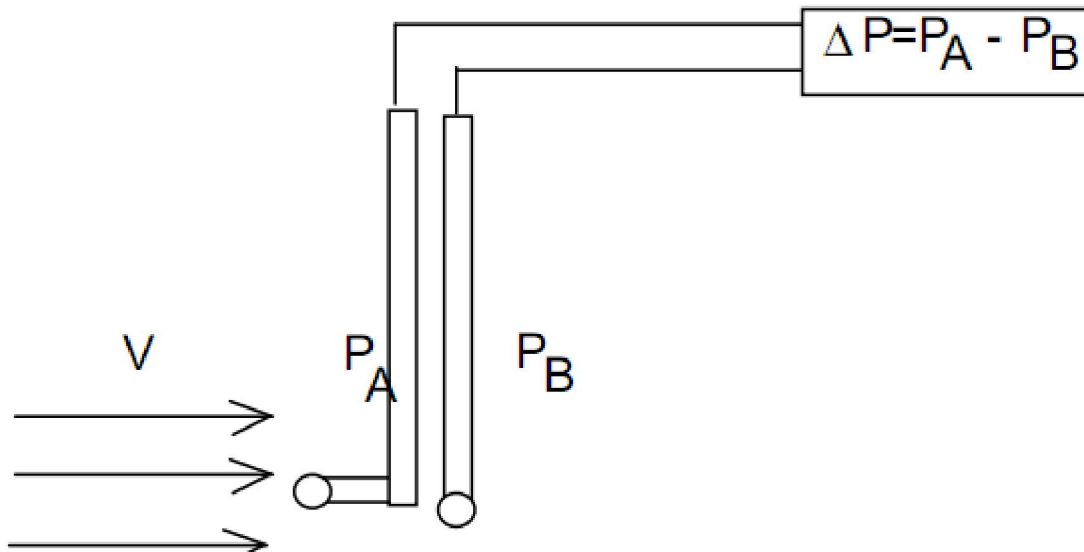


Slika Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..6. Krivulje pada tlaka za mjernu prigušnicu, mjernu mlaznicu i Venturijevu cijev

2.2 Mjerni uređaji na principu mjerenja brzine fluide

Na osnovu zakona o očuvanju energije za idealne tekućine može se izvesti jednostavan princip određivanja brzine tekućine mjerenjem razlike statičke i dinamičke komponente tlaka, odnosno odgovarajućih članova Bernoullijeve jednačine.

Pitotova cijev je mjerni uređaj koji se sastoji od dvije kapilare spojene na diferencijalni manometar. Jedna kapilara ima otvor okomit na strujnice tekućine i u njoj djeluje tlak jednak zbroju statičkog i dinamičkog tlaka, a druga kapilara ima otvor paralelan sa strujnicama i u njoj vlada statički tlak. Mjerni signal je razlika dvaju tlakova.



Slika Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..7. Pitotova cijev, shematski prikaz principa mjerenja

Tlakovi u kapilarama za dinamički (A) i statički tlak (B) su:

$$p_A = p + \frac{1}{2} \rho v^2 \quad p_B = p \quad (2.14)$$

Njihova razlika je:

$$\Delta p = p_A - p_B \quad \Delta p = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (2.15)$$

Brzinu fluida odredimo iz relacije:

$$v = C \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (2.16)$$

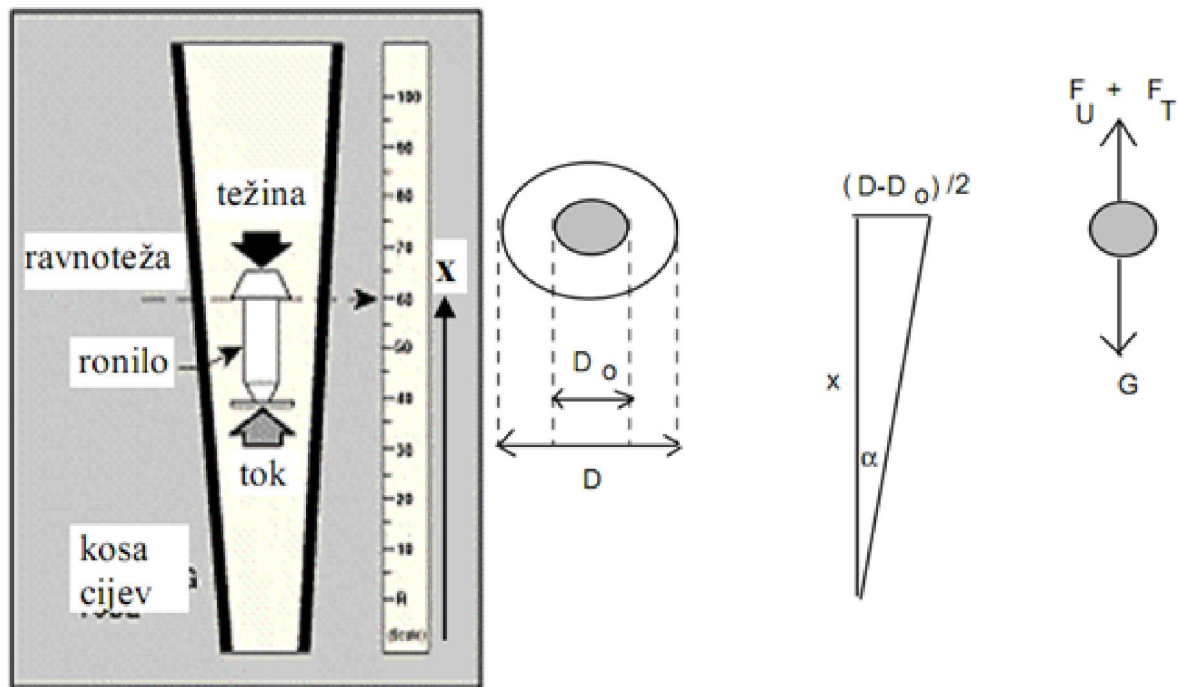
gdje je C konstanta koja se uvodi radi pada tlaka kod protjecanja realnog fluida.



Slika Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..8. Pitotova cijev, uređaj

Rotametar je najčešće upotrebljavani uređaj za mjerenje protoka u laboratoriju, a često se koristi i u procesnoj industriji. Velika zastupljenost rotametra je posljedica jednostavnosti uređaja, široke primjenljivosti s obzirom na mogućnost mjerenja protoka plinova i kapljevina i vrlo veliki mjerni opseg.

Mjerenje rotametrom se također zasniva na povezanosti pada tlaka koji nastaje protjecanjem kroz suženje i protoka tekućine. Za razliku od ugrađenih suženja koja imaju konstantan otvor, kod rotametra je površina suženja promjenljiva. Suženje tvori element (ronilo) koji je uronjen u tekućinu koja protječe kroz prozirnu vertikalnu cijev. Cijev ima promjenljivi radiju, najuži presjek na ulazu u cijev, a najširi na izlazu. Tekućina protječe kroz prsten između ronila i cijevi. Položaj ravnoteže određen je težinom ronila G , uzgonom F_v i silom F_r kojom fluid djeluje na ronilo. Mjerni signal je položaj ronila x koji se očitava na skali uz cijev.



Slika Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..9. Shematski prikaz načela mjerenja protoka rotametrom

U ravnotežnom položaju ronila vrijedi jednakost $F_u + F_T = G$. Izrazimo sile pomoću parametara

$$F_u = \rho_T V_R g \quad (2.17)$$

$$F_G = \rho_R V_R g \quad (2.18)$$

$$F_T = \frac{1}{2} \rho_T S_R f_T v^2 \quad (2.19)$$

- ρ_T i ρ_R su gustoće tekućine i ronila
- V_R i S_R su volumen i površina ronila
- f_T je faktor trenja između tekućine i ronila.
- g je ubrzanje sile teže

Uvrstimo izraze za sile u jednadžbu ravnoteže:

$$\rho_T V_R g + \frac{1}{2} \rho_T S_R f_T v^2 = \rho_R V_R g \quad (2.20)$$

Izrazimo brzinu tekućine:

$$v = \sqrt{2 \frac{g}{f_T} \frac{V_R}{S_R} \left(\frac{\rho_R}{\rho_T} - 1 \right)} \quad (2.21)$$

Volumenski protok fluida je određen produktom površine otvora između ronila i cijevi i srednje brzine tekućine:

$$Q_v = v \cdot S \quad (2.22)$$

Površinu otvora suženja izračunamo tako da odbijemo od površine veće kružnice (cijevi) površinu manje kružnice (ronila):

$$S = \left(\frac{D}{2} \right)^2 \pi - \left(\frac{D_0}{2} \right)^2 \pi \quad (2.22)$$

Izrazimo relaciju između promjera i kuta unutrašnje stijenke s vertikalom:

$$\tan \alpha = \frac{D - D_0}{2x} \quad (2.23)$$

Uvrstimo u izraz za površinu

$$S = \frac{1}{4} \pi \left[(D_0 + 2x \tan \alpha)^2 - D_0^2 \right] \quad (2.24)$$

Kvadriramo izraz u zagradi i zanemarimo iznos $\tan^2 \alpha$ jer je kut α vrlo mali po iznosu, te nakon sređivanja izraza dobijemo za površinu suženja

$$S = \pi D_0 x \tan \alpha \quad (2.25)$$

Nakon uvrštavanja površine u izraz za protok dobije se konačan rezultat

$$Q = \pi D_0 x \tan \alpha \sqrt{2 \frac{g}{f_T} \frac{V_R}{S_R} \left(\frac{\rho_R}{\rho_T} - 1 \right)} \quad (2.26)$$



Slika Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..10. Laboratorijski rotametri

Rotametri se koriste za mjerenje protoka kapljevina i plinova. Mjerni signal je položaj ronila. Prednosti ovog načina mjerenja su široko mjerno područje, naročito za mjerenje malih protoka, mjerenje se može provesti pri različitim temperaturama i tlakovima i točnost rezultata je dobra, ali bitno ovisi o točnosti baždarne karakteristike. Loša strana rotametra je nemogućnost mjerenja protoka fluida u kojima ima krutih čestica ili kapljevina sa mjehurićima plina.

2.3 Mjerenje protoka vrtloženjem

Iza nepokretnog objekta u struji fluida stvaraju se vrtlozi (Karmanovi vrtlozi) čija frekvencija je proporcionalna brzini strujanja:

$$f = S_t \frac{v}{d} \quad (2.27)$$

Gdje je:

v – brzina strujanja fluida

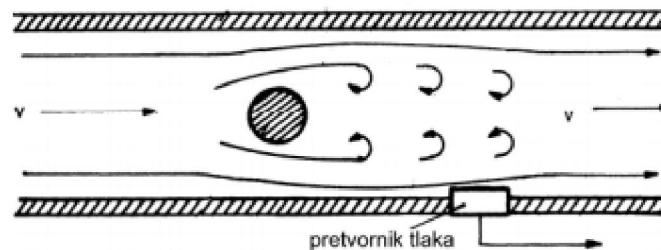
d – širina prepreke

$S_t = 0.185$ za strujanja u intervalu od $Re = 3 \cdot 10^2$ do $Re = 2 \cdot 10^5$ (Strouhalova konstanta)

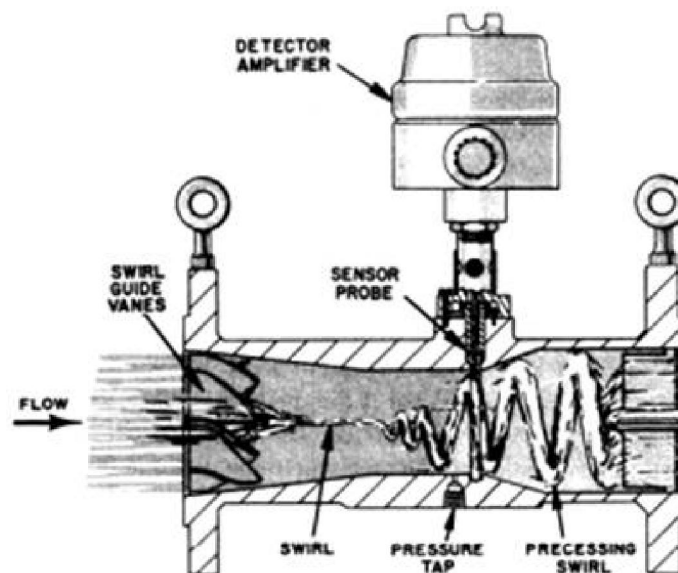
U područje vrtloženja se postavlja mjerni pretvornik koji može pratiti frekvenciju vrtloženja. Najčešće se mjeri frekvencija promjene tlaka uslijed vrtloženja, a mogu se koristiti termistori, tenzometri, ultrazvučna metoda, induktivna metoda, itd.

Iz izmjerene frekvencije protok se može izračunati prema izrazu:

$$Q = A \cdot v = \frac{A_d}{S_t} f \quad (2.28)$$



Slika Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..11. Mjesto vrtloženja iza nepomičnog objekta Ova mjerila imaju točnost unutar 1%. Ne koriste se za vrlo viskozne tekućine



Slika Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..12. Konstrukcija tipičnog uređaja za mjerenje protoka vrtloženjem

2.4 Mjerila protoka s turbinom

Sastoje se od rotora (turbine) s dvije ili više lopatica, koji se uslijed protoka fluida okreće kutnom brzinom linearno proporcionalnom brzini protjecanja.

Lopaticice rotora su od feromagnetskog materijala. Kada lopatica prolazi ispod permanentnog magneta dolazi do promjene magnetskog toka te se u zavojnici inducira napon frekvencije:

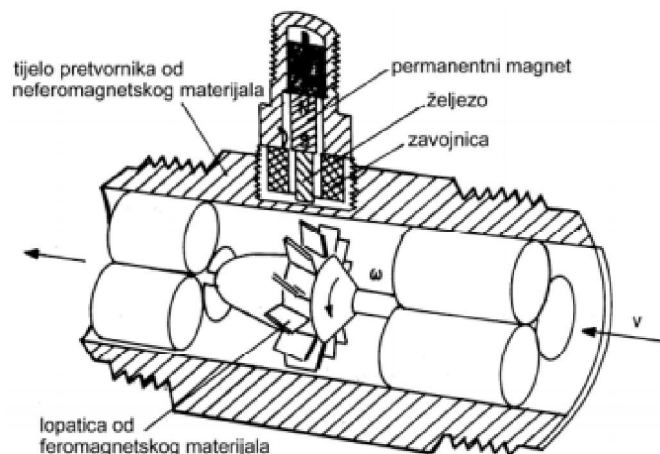
$$f = n \cdot m \quad (2.29)$$

pri čemu je n brzina vrtnje turbine a m broj lopatica.

Protok se određuje prema izrazu:

$$Q = K \cdot f \quad (2.30)$$

K - konstanta koju specificira proizvođač



Slika Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..13. Shematski prikaz mjernog uređaja s turbinom

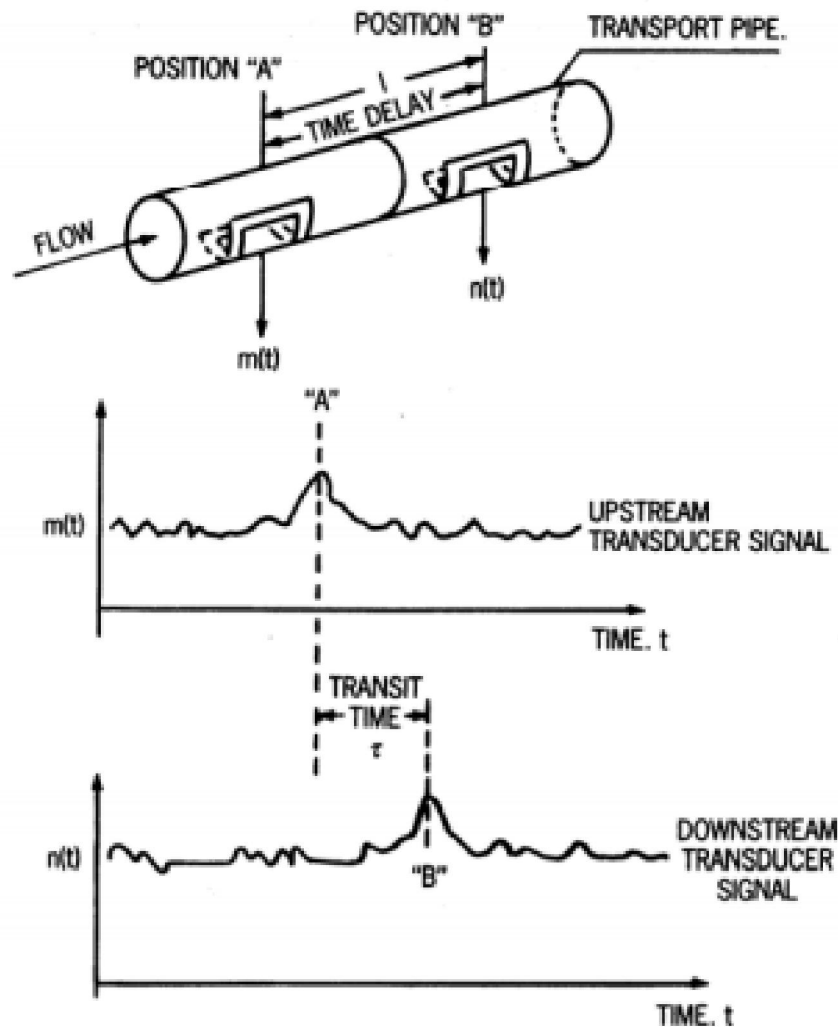
Zbog složenosti hidrodinamičkih efekata potrebno je mjerni uređaj posebno umjeriti za svaku tekućinu pri određenoj temperaturi i tlaku (za plinove). Ovi uređaji imaju dobre dinamičke karakteristike i vrlo su točni (točnost od 0.05% do 0.1%). Nedostatak mjerne metode je pad tlaka na propeleru.



Slika Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..14 Djelomični presjek mjerila protoka s rotorom

2.5 Kroskorelacijska metoda mjerenja

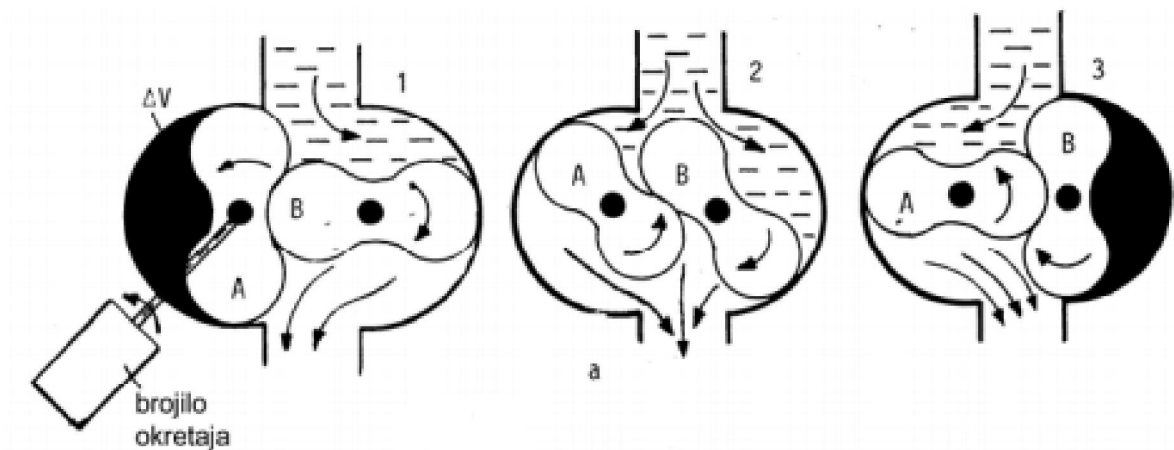
Jedna od najstarijih i najjednostavnijih metoda mjerenja protoka. U tvar koja se prenosi ubaci se marker i mjeri se vrijeme potrebno da marker prevali put između dvije točke. Iz izmjerene vremena i poznate udaljenosti između dvije kontrolne točke izračuna se brzina, a uz poznatu površinu presjeka i protok. Kao marker mogu poslužiti ubačene čestice, mjehurići, radioaktivnost, boja, itd.



Slika **Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..15.** Shematski prikaz kroskorelacijske metode mjerenja

2.6 Volumetrijska metoda mjerenja protoka

Temelje se na mjerenju volumena: tekućina koja ulazi u pretvornik dijeli se na elementarne volumene koji se broje. Broj tih elementarnih volumena koji prođu kroz pretvornik broje se mjerenjem broja okretaja nekog rotirajućeg elementa. Postoji veliki broj izvedbi – sve one predstavljaju određene tipove pneumatskih ili hidrauličkih motora koji za svoje okretanje koriste energiju fluida.



Slika Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..16. Shematski prikaz uređaja za volumetrijsko mjerenje protoka sa rotirajućim klipovima

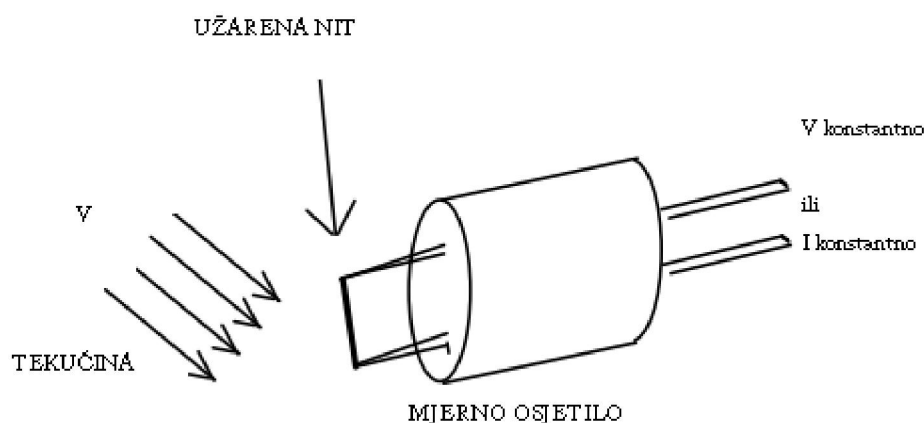
Trenutni protok proporcionalan je kutnoj brzini rotora, dok je ukupna protekla količina fluida u nekom vremenskom intervalu proporcionalna izbrojenom broju okretaja. U svakom položaju rotori se međusobno dodiruju onemogućavajući prolazak tekućine između dodirnih površina. Zazori između rotora i kućišta kao i međusobni zazori između rotora moraju biti vrlo mali (0.03 do 0.1 mm). Kroz te zazore ipak protječe određena količina tekućine i uzrokuje grešku mjerenja. Greška je posebno velika kod malih protoka, a ovisi o viskoznosti tekućine, mehaničkom trenju rotora i geometrijskim parametrima.

Prisutan je veliki pad tlaka pri prolasku tekućine kroz pretvornik pri maksimalnom protoku što predstavlja znatan gubitak energije koji se mora nadoknaditi pomoću pumpi. Nedostatak im je i nemogućnost primjene kod tekućina koje sadrže veće čvrste čestice.

2.7 Anemometri s ugrijanom žicom

Anemometri s ugrijanom žicom ili metalnim filmom koriste se za mjerenje brzine fluida i to uglavnom za dinamička mjerenja, kada se zahtijeva velika brzina odziva. Rad anemometra s ugrijanom žicom temelji se na promjeni otpora ugrijane žice zbog promjene odvođenja topline u ovisnosti o brzini fluida.

Žice su uglavnom od platine, volframa i nikla, duljine oko 5 mm i debljine 5 – 10 μm , otpora u hladnom stanju od 2 do 10 Ω . Žica je pričvršćena za dva držača koji su malih dimenzija da ne bi znatnije utjecali na brzinu strujanja na mjestu na kojem je postavljen anemometar. Anemometar s ugrijanom žicom osjetljivi su na mehaničke udare, a također postoji mogućnost pregaranja pri previsokoj temperaturi zagrijavanja. Zbog toga se u novije vrijeme koriste senzori u obliku tankog filma napareni na kvarcnu ili keramičku podlogu.



Slika Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..17. Shematski prikaz principa anemometarskog osjetila s ugrijanom žicom

2.8 Kalorimetrijska metoda mjerenja

Osnovni dijelovi kalorimetrijskog mjerila protoka su grijač i dva temperaturna senzora koji mjere temperaturu fluida ispred (T_1) i iza (T_2) grijača. Ako je snaga grijača P konstantna, uz zanemarivanje gubitka topline, pri stacionarnom toku fluida sva toplinska energija grijača se odnosi protokom fluida koji se zagrijava za temperaturnu razliku $\Delta T = T_2 - T_1$.

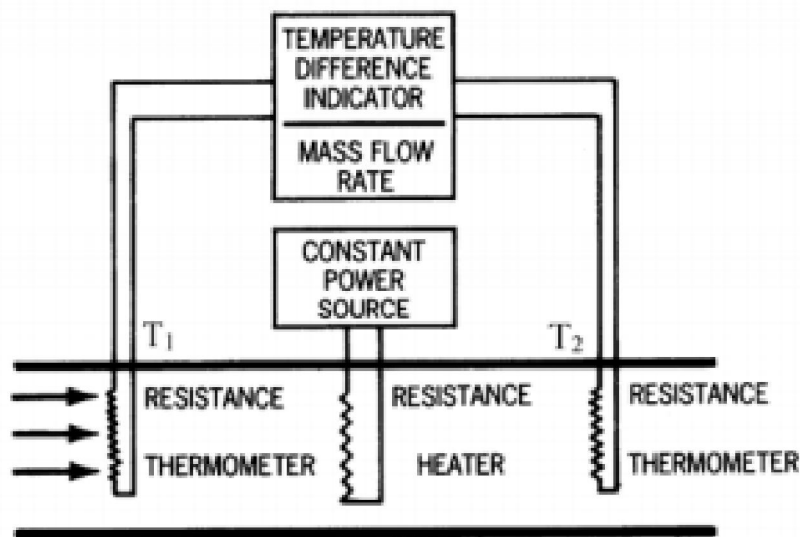
$$P = \frac{mc\Delta T}{t} = Q_m c \cdot \Delta T \quad (2.31)$$

$$Q_m = \frac{m}{t} = \frac{P}{c\Delta T} \quad (2.32)$$

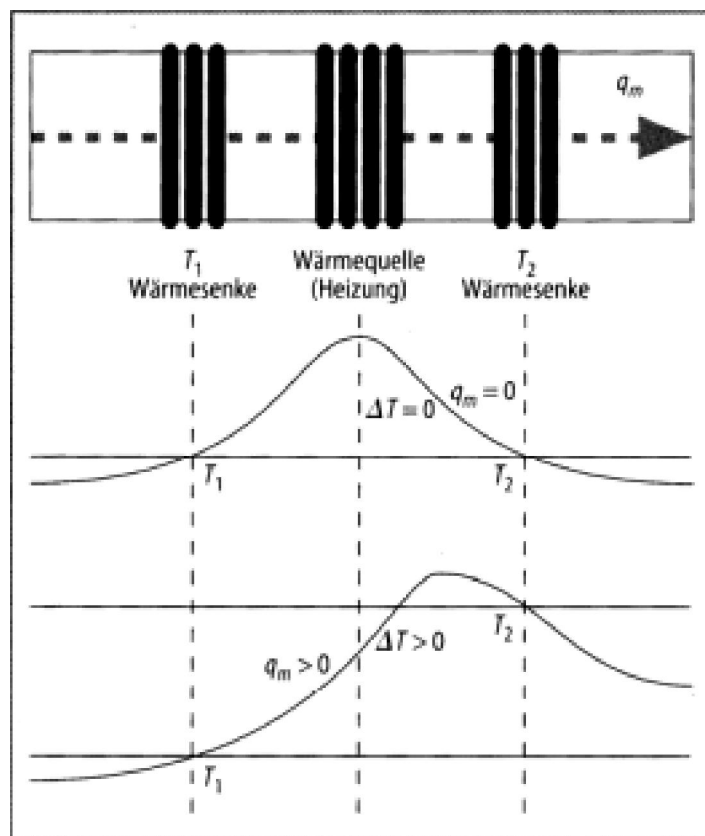
Q_m - maseni protok

c - specifični toplinski kapacitet

Pretvornici koji koriste kalorimetrijsku metodu daju podatak o masenom protoku, za razliku od ostalih pretvornika koji daju volumni protok

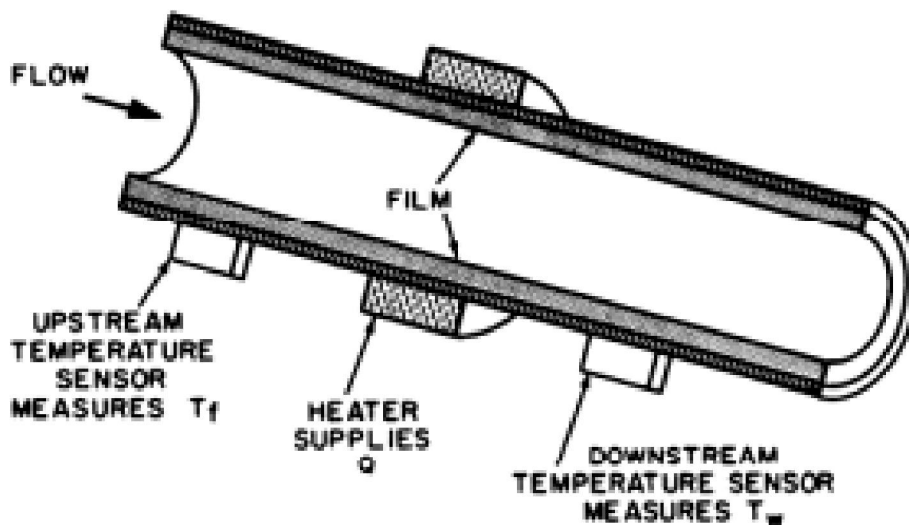


Slika **Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..18.** Heat transfer flowmeter



Slika Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..19. Promjena temperature kroz mjerilo protoka

Za mjerenje većih protoka grijač i temperaturni senzori se postavljaju izvan cijevi.



Slika Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..20. Kalorimetrijsko mjerilo za vanjskim senzorima i grijačem

3. Opis stanja

U sklopu Laboratorija za motore i vozila nalaze se dvije ispitne kabine za MSUI. U manjoj ispitnoj kabini se nalazi kočnica za ispitivanje marke ZÖLLER A-100 maksimalne snage

$$P_{koč} = 20 \text{ kW.}$$

Izmjena zraka u kabini je riješena na način da postoje dva kanala, jedan za ulaz svježeg zraka, a drugi za izlaz otpadnog zraka iz kabine. Unutar kanala promjera $d=450\text{mm}$ su ugrađeni ventilatori nepoznatih karakteristika. Poznato je samo da ventilator na izlaznom vodu ima veću snagu od ventilatora na ulaznom vodu kako bi se više zraka iz kabine odvodilo nego što se u kabinu dovodi svježeg zraka i na taj način se postiže mali potlak u odnosu na okolni tlak. Budući da nije poznato koliko zraka uđe u kabinu i koliko iz nje izađe, bit će potrebno izmjeriti protok zraka jednom od ranije opisanih metoda.

Pretpostavimo da na motornoj kočnici ispitujemo motor sljedećih karakteristika:

Otto motor

Efektivna snaga motora: $P_e = 20 \text{ kW}$

Efektivna potrošnja goriva: $g_e = 300 \text{ g/kWh}$

Faktor pretička zraka: $\lambda = 1.15$

Potrošnja goriva po satu iznosi:

$$\dot{G}_h = g_e \cdot \lambda \cdot P_e$$

$$\dot{G}_h = 6 \frac{\text{kg}_g}{\text{s}}$$

Potrebna količina zraka po satu tada iznosi:

$$Z_h = \dot{G}_h \lambda \cdot Z_0$$

$$Z_h = 101.43 \frac{\text{kg}_z}{\text{s}}$$

Gdje je Z_0 stehiometrijska količina zraka za izgaranje 1 kg goriva, za benzin:

$$\text{za benzin } Z_0 \approx 14.7 \frac{\text{kg}_z}{\text{kg}_g}$$

(podatak uzet iz skripte „Ispitivanje motora na kočnici“, 2005., prof.dr.sc. Ivan Mahalec, doc.mr.sc. Zoran Lulić, Darko Kozarac, dipl.ing. i Goran Šagi)

U tom slučaju je iz jednadžbe stanja idealnog plina volumenski protok potreban za izgaranje jednak:

$$Q_{izg} = \frac{Z_h RT}{p_a} = 0.02181 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 1.3086 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} = 78.503 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

p_a – apsolutni tlak u kabini, Pa, koji se pretpostavlja da je jednak standardnom atmosferskom tlaku $p_a=101325$ Pa

R - plinska konstanta i iznosi:

$$R = 287.1 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \text{ za zrak}$$

T – temperatura, K, pretpostavljamo standardne uvjete pa je $T=293.15$ K

Ukupna potrebna količina zraka se sastoji od zraka potrebnog za izgaranje i hlađenje motora

$$Q_{uk} = Q_{izg} + Q_{hl}$$

Gdje je

$$Q_{hl} = \frac{q_v}{P_e}$$

q_v – specifični volumenski protok zraka za hlađenje motora:

$$q_v = 75 \frac{\text{m}^3}{\text{kWh}}$$

(podatak uzet iz skripte „Konstrukcije motora“, 2010., prof.dr.sc. Ivan Mahalec, doc.mr.sc. Zoran Lulić, Darko Kozarac, dip.ing) Podatak je uzet za najnepovoljniji slučaj motora, Diesel motor s podijeljenim prostorom izgaranja.

$$Q_{hl} = \frac{q_v}{P_e} = 3.75 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$Q_{hl} \approx 80 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

4. Mjerenje protoka zraka u laboratoriju

Mjerenje protoka u laboratoriju je izvršeno pomoću Prandtl-Pitotove cijevi koja mjeri razliku dinamičkog i statičkog tlaka.

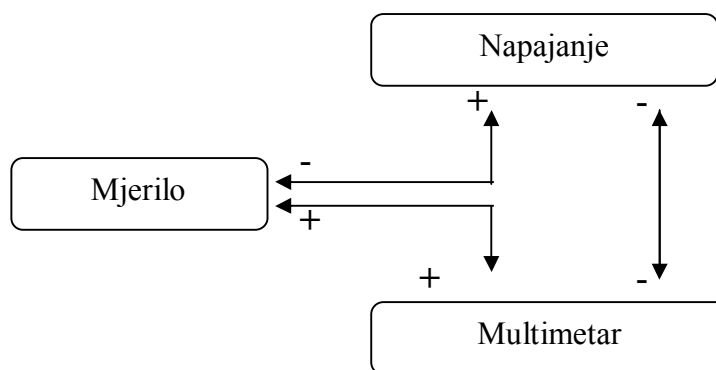
Prije samog mjerenja Prandtl-Pitotovom cijevi je pomoću digitalnog anemometra PEAK TECH 5060 provjereno da li se očekivane vrijednosti mjerenja nalaze unutar mjernog područja odabranog mjernog instrumenta. U ovom slučaju to je bilo područje od 0 do 1000 Pa (0 do 10 mbar). Nakon što je utvrđeno da je odabran mjerni instrument s odgovarajućim mjernim područjem, mjerenje je moglo početi.

Podaci o mjernoj opremi:

- Prandtl-Pitotova cijev promjera $\varnothing$ 6 mm
- osjetnik diferencijalnog tlaka marke GE Druck, model LPX 9381
- ispravljač izmjenične struje

Mjerenje je izvršeno u ispitnoj kabini na dovodnoj i odvodnoj cijevi. Izvršeno je više mjerenja pri različitim uvjetima, zatvorenim i otvorenim vratima kabine, sa oba ventilatora uključena i sa jednim uključenim, a jednim isključenim ventilatorom. Na jednom dijelu cijevi je skalpelom probušena rupa kroz koju je prolazila Prandtl- Pitotova cijev. Oko rupe je folija kojom je smanjena zračnost između cijevi i rupe kako ne bi došlo do izlaza zraka na tom mjestu i smanjenja protoka u cijevi što bi nam dalo netočne rezultate mjerenja. Mjerenje je

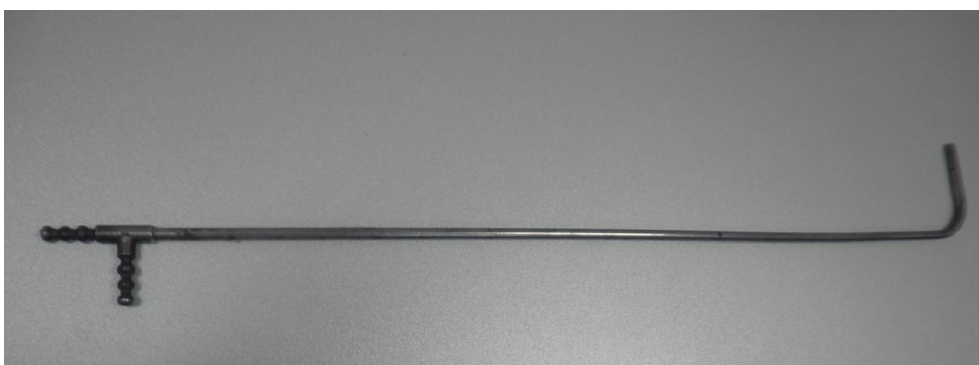
izvršeno na polovici promjera cijevi (0.5 d) , na četvrtini promjera cijevi ($\frac{1}{4}$ d) te uz samu stjenku gdje su rezultati bili približno jednaki nuli. Na Prandtl-Pitotovoj cijevi su napravljene oznake kako bi točno znali na kojem dijelu promjera ulazne odnosno izlazne cijevi se nalazi mjerilo.



Slika Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..1. Shema spajanja komponenata mjernog uređaja



Slika Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..2. Digitalni anemometar PEAK TECH 5060



Slika Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..3. Prandtl-Pitotova cijev vanjskog promjera Ø 6 mm



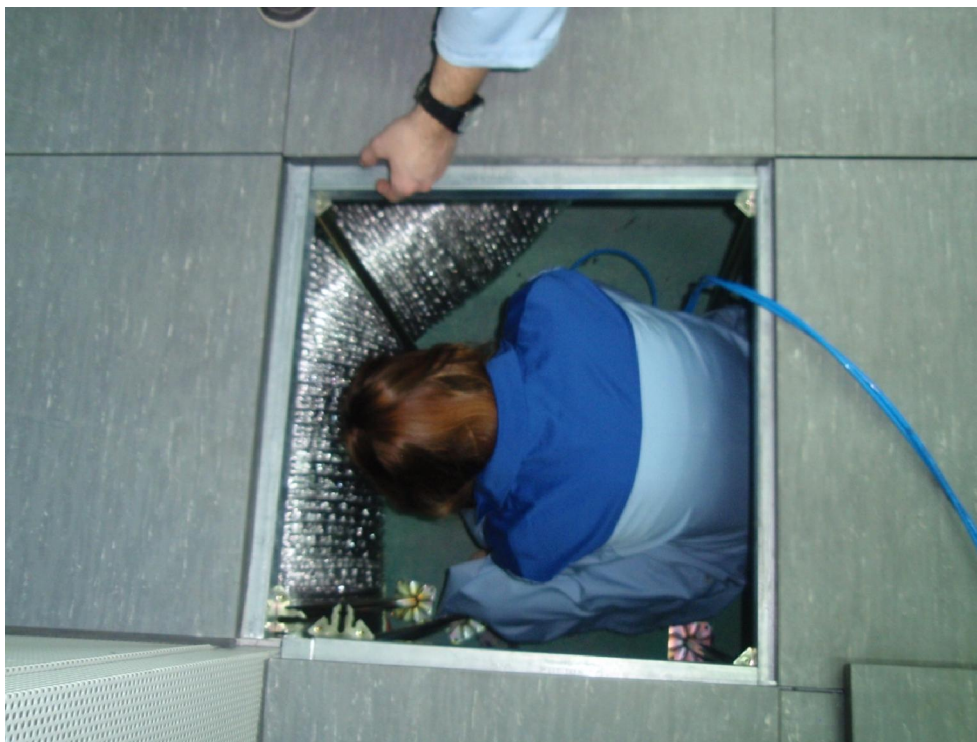
Slika Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..4. Prandt l-Pitotova cijev sa oznakama



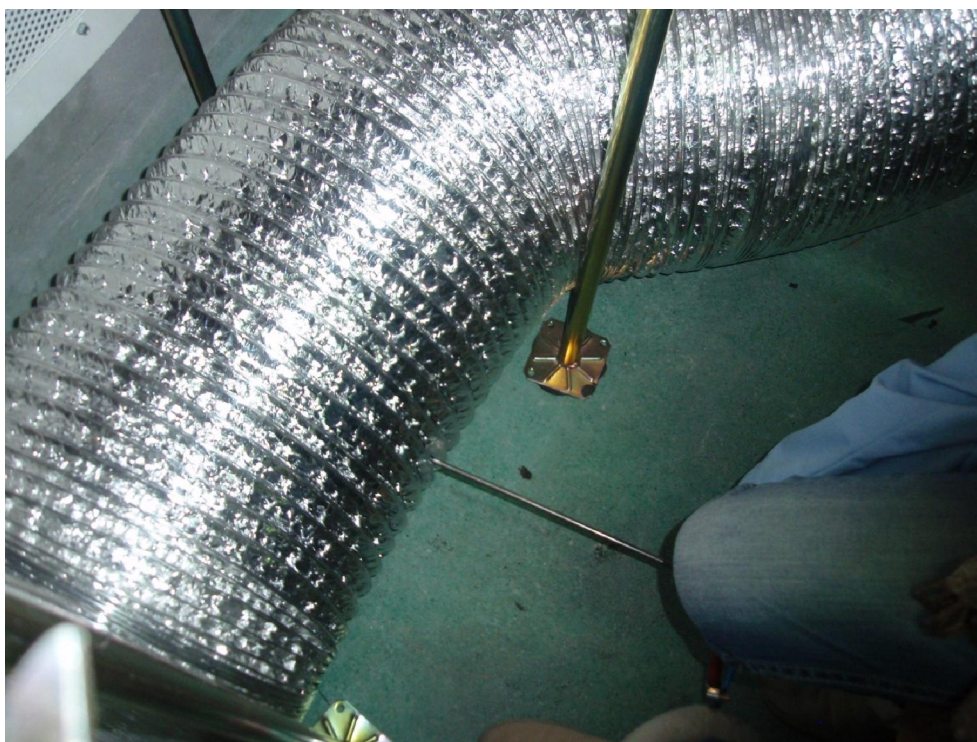
Slika Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..5. Osjetnik diferencijalnog tlaka marke GE Druck, model LPX 9381



Slika Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..6. Ispravljač s regulacijom napona i struje



Slika Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..7. Mjerenje na izlaznoj cijevi



Slika Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..8. Mjerenje na izlaznoj cijevi



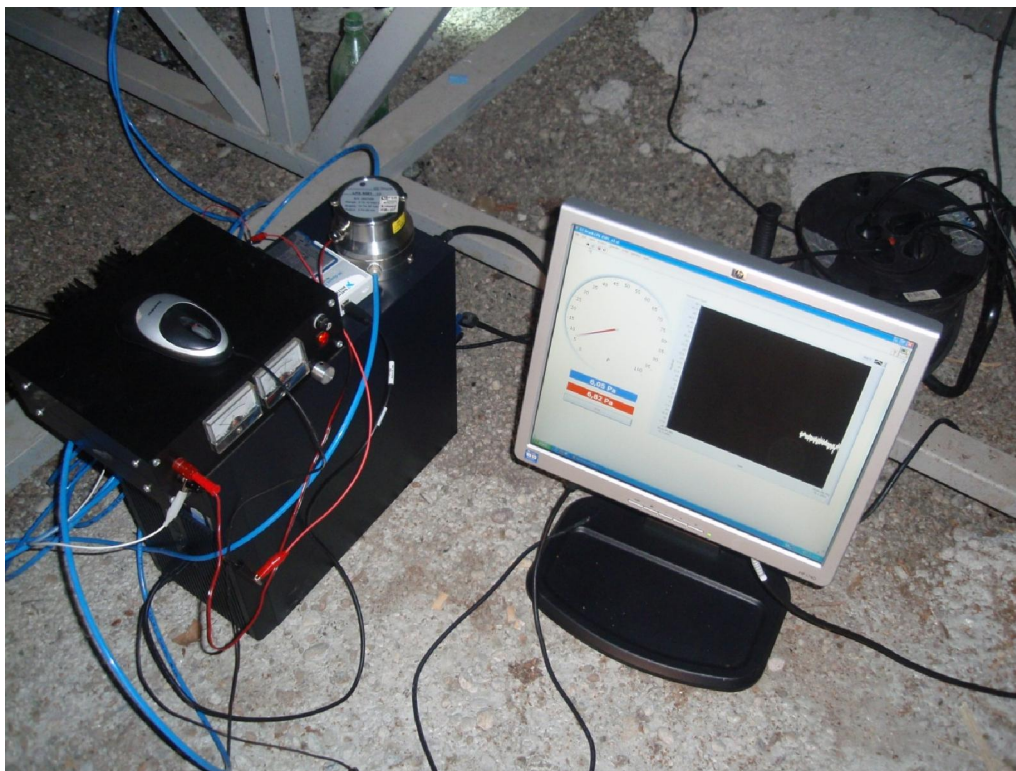
Slika Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..9. Priprema za mjerenje na ulaznoj cijevi



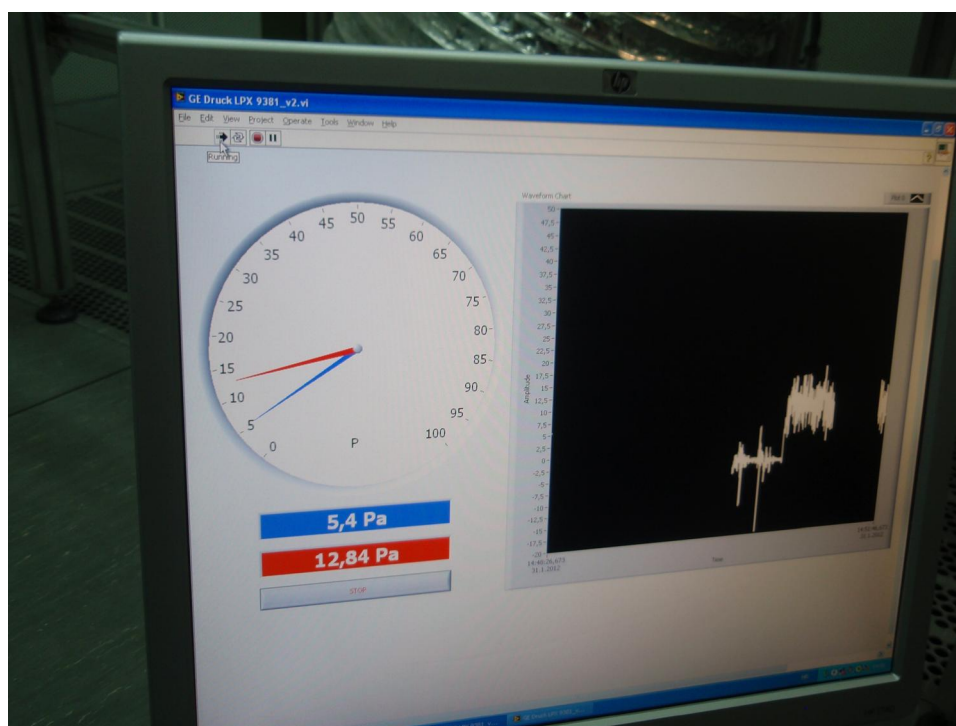
Slika Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..10. Mjerenje na ulaznoj cijevi



Slika Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..11. Mjerenje na ulaznoj cijevi



Slika Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..12. Mjerna oprema na mjestu mjerenja



Slika Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..13. Mjerna oprema na mjestu mjerenja

Rezultati mjerenja prikazani su u tablici:

Tablica **Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..**2. Rezultati mjerenja za odvodnu cijev u mjernoj jedinici Pa

	Odvodna cijev											
	Vrata kabine zatvorena						Vrata kabine otvorena					
	0.5 d			0.25 d			0.5 d			0.25 d		
Oba ventilatora uključena	9.74	9.02	9.34	3.59	3.05	3.98	9.98	9.78	9.08	3.48	3.49	3.08
Ulazni ventilator isključen	9.88	9.58	9.21	3.48	3.22	2.98	9.87	9.58	9.66	3.24	3.02	3.22

Tablica **Pogreška! Za dodavanje Heading 1 tekstu koji želite da se ovdje pojavi koristite karticu Početno..**2. Rezultati mjerenja za dovodnu cijev u mjernoj jedinici, Pa

Dovodna cijev						
Dubina mjerenja	0.5 d			0.25 d		
$p, \text{ Pa}$	6.28	5.98	6.22	2.14	2.10	2.07

Iz rezultata primjećujemo da se vrijednosti tlaka u cijevi znatno ne mijenjaju u ovisnosti o tome da li su vrata kabine otvorena ili zatvorena i da li je ventilator za dovod zraka uključen ili isključen.

Uzmu li se srednje vrijednosti tlakova dobiju se sljedeće brzine:

Ulazna cijev:

$$v_{sr} = 2.07 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Izlazna cijev:

$$v_{sr} = 3.95 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$A_{ulaz} = \frac{d_{ul}^2 \pi}{4} = \frac{0.5^2 \pi}{4} = 0.196 \text{ m}^2$$

$$A_{izlaz} = \frac{d_{iz}^2 \pi}{4} = \frac{0.45^2 \pi}{4} = 0.159 \text{ m}^2$$

Pomnože li se brzine sa površinama poprečnih presjeka dobivaju se volumenski protoci:

$$Q_{ul} = v_{ul, sr} \cdot A_{ulaz} = 2,07 \cdot 0,196 = 0.406 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 24.34 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} = 1460.6 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$Q_{izl} = v_{izl, sr} \cdot A_{izlaz} = 3,95 \cdot 0,159 = 0.628 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 37.69 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} = 2261.6 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Izračunati volumenski protoci zadovoljavaju potrebe motora za zrakom za izgaranje i hlađenje.

5. Mjerna nesigurnost

Mjerni je rezultat tek procjena vrijednosti mjerne veličine te da bi bio potpun, mora sadržavati i izjavu o mjernoj nesigurnosti.

Mjerna je nesigurnost je parametar, pridružen rezultatu mjerenja, koji karakterizira rasipanje vrijednosti koje bi razumno mogle opisati mjernu veličinu.

Mjerna nesigurnost ukazuje na raspon u kojemu se s određenom vjerojatnošću, odnosno uz određenu razinu povjerenja, nalazi točna vrijednost rezultata.

Mjerenja nisu savršena, kako zbog djelovanja slučajnih utjecaja (trenutna promjena temperature, tlaka i vlage ili neiskustvo mjeritelja, nesavršenost uređaja i osjetila) tako i zbog ograničenih mogućnosti korekcije sustavnih djelovanja (promjena karakteristike instrumenta između dva umjeravanja, utjecaj mjeritelja pri očitavanju analogne skale, nesigurnost vrijednosti referentnog etalona itd.) Mjerna nesigurnost je upravo posljedica djelovanja slučajnih utjecaja i ograničenih mogućnosti korekcije sustavnih djelovanja.

U našem slučaju dominantne utjecajne veličine koje bi mogle utjecati na odstupanje od točnog rezultata su nesigurnost pretvornika koja se prema specifikaciji proizvođača nalazi unutar

$\pm 0.005 \%$ te nesigurnost multimetra koja nam nije poznata.

6. Zaključak

Zadatak ovog rada bio je izmjeriti protok zraka u kabini za ispitivanje motora s unutarnjim izgaranjem, budući da su prilikom preuređivanja laboratorija u ventilacijski sustav ugrađeni ventilatori koji su već postojali, a njihove karakteristike su nepoznate.

Prije samog mjerenja je trebalo proučiti metode mjerenja protoka zraka i odabrati najpogodniju metodu za naš slučaj. Odabrana je metoda mjerenja pomoću Prandtl-Pitotove cijevi. Oprema je posuđena od Laboratorija za procesna mjerenja koji se nalazi u sklopu fakulteta. Isti laboratorij, koji je nositelj državnog etalona za tlak, je i umjerio opremu korištenu za mjerenje.

Mjerenje je provedeno pri različitim uvjetima, zatvorenim i otvorenim vratima kabine, sa oba ventilatora uključena i sa jednim uključenim, a jednim isključenim ventilatorom. Iz rezultata primjećujemo da se vrijednosti tlaka u cijevi znatno ne mijenjaju u ovisnosti o tome da li su vrata kabine otvorena ili zatvorena i da li je ventilator za dovod zraka uključen ili isključen.

Mjerenje je trebalo provesti i za vrijeme rada motora u kabini, ali zbog tehničkih razloga, velike hladnoće i manjka vremena to mjerenje nije provedeno.

Iz rezultata mjerenja je vidljivo da je protok zraka u kabini dovoljan za potrebe motora maksimalne snage koji se može ispitivati na kočnici.

Savjetuje se da se u kabinu postavi mjerni uređaj npr. manometar koji bi konstantno mjerio tlak u kabini i davao informacije o razini potlaka. Na taj bi se način osigurali kvalitetni rezultati ispitivanja MSUI.

Literatura

- [1] Prof.dr.sc. Ivan Mahalec, doc.dr.sc. Zoran Lulić, Darko Kozarac, dipl.ing. i Goran Šagi, „Ispitivanje motora na kočnici“, Zagreb, 2005.
- [2] Prof.dr.sc. Ivan Mahalec, doc.dr.sc. Zoran Lulić, Darko Kozarac, dip.ing., „Konstrukcije motora“, Zagreb, 2010.
- [3] Robert P. Bendict „Fundamentals of temperature, pressure and flow measurement“, John Wiley and Sons Inc., New York (1969.)
- [4] Richard S. Figlio, Donald E. Beasley „Theory and design for mechanical measurements“, John Wiley and Sons Inc., New York (1991.)
- [5] Bogosav Milenković, „Priručnik za mjerenje protoka fluida“, SMEITS, Beograd, 2000.
- [6] <http://www.unidu.hr/datoteke/majelic/ABP-6.pdf>, prosinac 2011.
- [7] Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, N.Bolf, „Mjerenja i automatsko vođenje procesa“. Dostupno na: https://pierre.fkit.hr/files/nastava/zmavp/MAVP_06-07_Mjerenje_protoka_1.dio.pdf (siječanj 2012.)
- [8] „Mjerni pretvornici“, prilog predavanjima. Dostupno na: http://www.fer.unizg.hr/_download/repository/Mjerenje-Protoka.pdf (siječanj 2012.)
- [9] Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, ak.g. 2008/09. „Elementi automatizacije postrojenja“, auditorne vježbe. Dostupno na: http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zae/eap/materijali/av/EAP_av_03.pdf (siječanj 2012.)
- [10] <http://de.wikipedia.org/wiki/Durchflusssensor> , siječanj 2012.
- [11] Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Laboratorij za procesna mjerenja, podloge za vježbe iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja „Određivanje mjerne nesigurnosti umjeravanja mikrometra“