

# Metode i pogreške kod mjerenja protoka

---

Hrgarek, Petar

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:397425>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-30**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Petar Hrgarek**

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **METODE I POGREŠKE KOD MJERENJA PROTOKA**

Mentor:

Prof. dr. sc. Davor Zvizdić, dipl. ing.

Student:

Petar Hrgarek

Zagreb, 2015.

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

Zahvaljujem se dr.sc. Davoru Zvizdiću koji je prihvatio mentorstvo te me stručno vodio kroz rad i ustupio mi navedenu literaturu.

Zahvaljujem se asistentima Alenu Jurišinec i Danijelu Šestan na ustupljenim informacijama vezano za rad mjernih linija u Laboratoriju za procesna mjerenja.

Petar Hrgarek



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

Mat. br.:

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

Opis zadatka:

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
2. METODE MJERENJA PROTOKA.....	2
2.1. Coriolis-ovi protokomjeri .....	2
2.2. Mjerila protoka na temelju metode prigušivanja .....	3
2.2.1. Venturijeva cijev .....	3
2.2.2. Mjerna prigušnica .....	4
2.2.3. Mlaznica.....	5
2.3. Turbinska mjerila protoka.....	6
2.4. Ultrazvučni protokomjeri .....	8
2.4.1. Ultrazvučni protokomjeri frekvencijskog pomaka .....	8
2.4.2. Ultrazvučni protokomjeri vremena prolaza .....	9
3. GRAVIMETRIJSKA MJERNA METODA .....	11
3.1. Mjerna linija Actaris RAC 2200/1/5-AG-EH .....	11
3.1.1. Opis mjerne linije.....	11
3.1.2. Mjeriteljski opis .....	15
3.1.2.1. Tok vode .....	15
3.1.2.2. Vrste ispitivanja .....	17
3.2. Mjerna linija JUSTUR MT 10/15-40.....	18
3.2.1. Opis mjerne linije.....	18
4. OPIS MJERENJA.....	20
4.1. Tijek procesa mjerenja .....	20
5. MJERNA NESIGURNOST .....	25
5.1. Mjerna nesigurnost tipa A i tipa B .....	25
5.2. Mjerna nesigurnost mjerne linije JUSTUR MT 10/15-40 .....	27
6. REZULTATI MJERENJA .....	29
7. ZAKLJUČAK.....	31
LITERATURA.....	32
PRILOZI.....	33

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Konstrukcija Coriolis-ovog protokomjera.....	2
Slika 2.	Venturijeva cijev .....	4
Slika 3.	Mjerna prigušnica.....	5
Slika 4.	Mlaznica .....	6
Slika 5.	Turbinsko mjerilo protoka.....	7
Slika 6.	Ultrazvučni protokomjer frekvencijskog pomaka.....	9
Slika 7.	Princip rada ultrazvučnog protokomjera vremena prolaza.....	10
Slika 8.	Ispitna klupa .....	12
Slika 9.	Platforma sa vagom .....	13
Slika 10.	Prikaz toka vode kroz mjernu liniju .....	15
Slika 11.	Pumpa za dobavljanje vode iz spremnika .....	16
Slika 12.	Topli i hladni spremnik vode.....	16
Slika 13.	Shema mjerne linije.....	18
Slika 14.	Ispitna klupa sa kalorimetrima .....	20
Slika 15.	Kalorimetar 1 .....	21
Slika 16.	Kalorimetar 2.....	21
Slika 17.	Izgled softvera na računalu.....	22
Slika 18.	Spremnik s vodom.....	23
Slika 19.	Spremnik na vagi.....	23
Slika 20.	Magnetno induktivni protokomjeri (MID) .....	24
Slika 21.	Gaussova razdioba.....	25

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Mjerna nesigurnost kod nominalnog protoka $Q_p$ .....	27
Tablica 2. Mjerna nesigurnost kod 10 % nominalnog protoka $Q_p$ .....	28
Tablica 3. Mjerna nesigurnost kod minimalnog protoka $Q_i$ .....	28
Tablica 4. Podaci o kalorimetrima .....	29
Tablica 5. Vrijednosti stvarnog volumnog protoka dobivene preko vage sa iskazanom mjernom nesigurnošću .....	29
Tablica 6. Rezultati dobiveni na kalorimetrima .....	30



## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$q_m$	kg/s	-maseni protok
$q_v$	m <sup>3</sup> /s	-volumni protok
$C_d$	-	-faktor kontrakcije protoka
$A_2$	m <sup>2</sup>	-površina najužeg presjeka
$p_1$	Pa	-tlak prije mjerila protoka
$p_2$	Pa	-tlak u najužem presjeku
$\rho$	kg/ m <sup>3</sup>	-gustoća fluida
$d_1$	m	-promjer cjevovoda
$d_2$	m	-promjer u najužem presjeku
$f$	1/s	-frekvencija vrtnje turbinskog kola
$K$	1/m <sup>3</sup>	-faktor turbine
$v$	m/s	-brzina fluida
$A$	m <sup>2</sup>	-površina presjeka kroz koji struji fluid
$c$	m/s	-brzina zvuka u fluidu
$f_o$	1/s	-frekvencija odašiljača
$f_p$	1/s	-frekvencija prijemnika
$\varphi$	rad	-kut odašiljanja frekvencije
$t_u$	s	-vrijeme uzvodnog prolaza signala
$t_n$	s	-vrijeme nizvodnog prolaza signala
$\Delta t$	s	-razlika vremena uzvodnog i nizvodnog prolaza signala
$l$	m	-dužina prolaza (razmak između pretvornika)
$u$	ovisno o mjeranju	-mjerna nesigurnost
$n$	-	-broj ponovljenih mjerenja
$x_i$	ovisno o mjeranju	-vrijednost rezultata kod pojedinog mjerenja
$\bar{x}$	ovisno o mjeranju	-srednja vrijednost rezultata
$s$	ovisno o mjeranju	-standardna devijacija
$u_c$	ovisno o mjeranju	-složena mjerna nesigurnost
$k$	-	-faktor prekrivanja
$U$	ovisno o mjeranju	-proširena mjerna nesigurnost
$Q_p$	l/h	-nominalni protok
$Q_i$	l/h	-minimalni protok
$V_c$	dm <sup>3</sup>	-volumen dobiven preko mase na vagi

---

$V_i$	$\text{dm}^3$	-volumen dobiven preko kalorimetara
P	%	-pogreška, odstupanje kalorimetara od stvarne vrijednosti

## **SAŽETAK**

Rad smo započeli pregledom nekoliko metoda za mjerenje masenog ili volumnog protoka. Za mjerenje masenog protoka smo spomenuli Coriolis-ove protokomjere, dok smo za mjerenje volumnog protoka dali opis metoda koje rade na principu prigušivanja, turbinskih mjerila protoka i ultrazvučnih protokomjera. Ultrazvučni protokomjeri su jedini koji se ugrađuju sa vanjske strane na cijevi te nemaju nikakva utjecaja na profil strujanja kroz cjevovod. Dali smo detaljan opis dviju mjernih linija koje rade na principu gravimetrijske metode, kod koje se volumen vode računa preko njezine mase. Proveli smo mjerenja na jednoj liniji pomoću dva kalorimetra, te smo vidjeli da, iako su kalorimetri identični, svaki je pokazao drugačije rezultate. Na kraju smo izračunali mjernu nesigurnost za našu liniju, te smo vidjeli da najviše utjecaja na rezultat mjerenja ima temperatura koja direktno utječe na gustoću vode, pa tako i na njezin volumen.

Ključne riječi: maseni protok; volumni protok; gravimetrijska metoda; mjerna nesigurnost

## **SUMMARY**

We started our work with overview of few methods for measuring mass or volume flow rate. For measuring mass flow rate we mentioned Coriolis mass flow meter, while for measuring volume flow rate, we gave a description of methods working on reducing the fluid pressure, turbine flow meters and ultrasonic flow meters. Ultrasonic flow meters are the only one which are installed on the outside of pipeline and they have no influence on the flow profile in the pipeline. We gave a detailed description of two measuring lines which work on principle of gravimetric method which gave us a water volume over the water mass. We carry out the measurements on one measuring line with two calorimeters, and we saw, although the calorimeters were identical, we got different results on each one. At the end, we calculate the measurement uncertainty for our line, and we saw that the biggest influence on the result has the water temperature, which directly affect on water density, so it also has a direct effect on her volume.

Key words: mass flow rate; volume flow rate; gravimetric method; measurement uncertainty

## **1. UVOD**

Mjerenje protoka je proces s kojim se susrećemo u svakodnevnom životu, od industrijskih potreba sve do potreba u kućanstvima u kojima se svakodnevno mjeri potrošnja vode, plina, struje ili direktno toplinske energije. Omogućuju nam da se optimiziraju ili smanje, ukoliko je moguće, potrošnje istih što u konačnici dovodi do očuvanja okoliša i smanjenja njegovog onečišćenja.

Postoje razne vrste i metode mjerenja protoka, a u ovome ćemo radu razmotriti neke od njih. Počet ćemo s mjerilima koje mjere direktno protok mase u jedinici vremena. Zatim ćemo opisati nekoliko mjerila koja mjere protok volumena u jedinici vremena, a završit ćemo s gravimetrijskom mjernom linijom koju imamo u Laboratoriju za procesna mjerenja. U Laboratoriju se nalaze dvije mjerne linije te ćemo dati detaljni opis obje linije, a na jednoj ćemo obaviti mjerenje protoka vode u jedinici vremena te ćemo usporediti rezultate izmjerene na kalorimetrima sa poznatim protokom vode koji je pušten kroz ispitnu klupu, a dobiven je gravimetrijskom metodom. Rad ćemo završiti razmatranjem mjerne nesigurnosti na provedenim mjerenjima.

## 2. METODE MJERENJA PROTOKA

Instrumenti koji se koriste za mjerenje protoka načelno se mogu svrstati u dvije grupe:

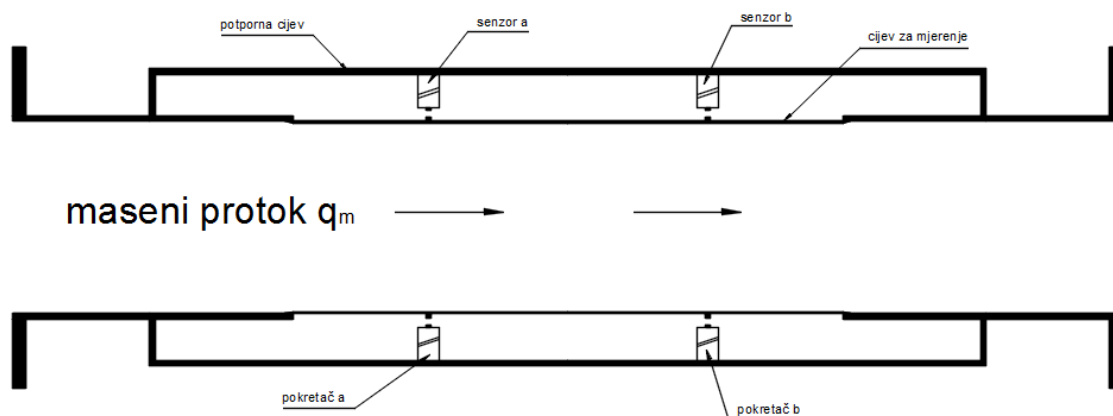
*Mjerila količine:* U ovu grupu pripadaju instrumenti koji mjere ukupnu količinu koja struji u vremenu te se prosječni protok dobije tako da se ukupna količina podijeli sa proteklom vremenom.

*Mjerila protoka:* U ovu grupu pripadaju instrumenti koji mjere stvarni protok. Uređaji za mjerenje protoka često trebaju precizno mjerenje temperature i tlaka da bi se točno odredio rezultat s obzirom na mjernu nesigurnost. Ukupni rezultat mjerenja ovisi o točnosti mjerila za temperaturu i tlak.

S obzirom na ove dvije grupe instrumenata, u ovome radu ćemo dati opis nekoliko osnovnih i najčešće korištenih metoda za mjerenje kako masenog tako i volumnog protoka.

### 2.1. Coriolis-ovi protokomjeri

Coriolis-ovi protokomjeri mjere direktno maseni protok, analizirajući oscilacije cijevi za mjerenje. Preciznost ove metode je velika te na mjerenja nema velikog utjecaja viskoznost, toplinska provodnost ili toplinski kapacitet tekućine. Koristeći ovu metodu, također je moguće, sa velikom preciznošću, mjeriti gustoću tekućine. Uređaji, koji koriste samo ravnu cijev kao mjerilo, nemaju nikakva utjecaja na cjelokupan tok tekućine. Isto tako je mali pad tlaka, budući da elektromagnetski senzori koji mjere brzinu u cijevi, ne predstavljaju nikakvu prepreku strujanju tekućine.



Slika 1. Konstrukcija Coriolis-ovog protokomjera

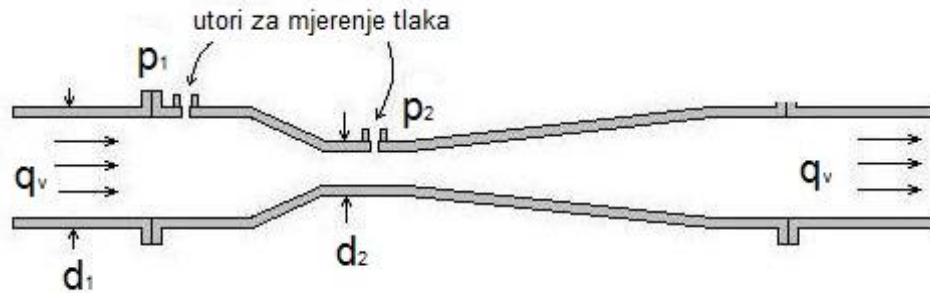
Glavni princip rada Coriolis-ovog protokomjera je ravna cijev čvrsto spojena na potpunu cijev [Slika 1]. Oscilacije cijevi su stimulirane pomoću dva pokretača smještena simetrično s obzirom na sredinu cijevi. Stimuliranjem cijevi sa harmonijskim silama, jednakim u fazi i amplitudi, cijev oscilira u prvoj vlastitoj frekvenciji, pokazujući da nema masenog protoka kroz cijev ( $q_m = 0$ ). Izazvane oscilacije cijevi se mjere preko dva elektromagnetska senzora brzine na mjestima  $a$  i  $b$ . Ako nema masenog protoka ( $q_m = 0$ ), signali mjerene brzine su također u fazi. Međudjelovanje prisilnih oscilacija cijevi u prvoj vlastitoj frekvenciji i protoka ( $q_m > 0$ ) će izazvati Coriolis-ove sile da imaju suprotni smjer u gornjem i donjem dijelu cijevi. Taj par sila, formirajući harmonijski moment, stimulira cijev u njezinoj drugoj vlastitoj frekvenciji. Poklapanje oscilacija u prvoj i drugoj vlastitoj frekvenciji, rezultira sa pomakom u fazi signala brzine na lokacijama  $a$  i  $b$ . Budući da je pomak u fazi proporcionalan masenom protoku, taj pomak se koristi kao prikaz masenog protoka.

## 2.2. Mjerila protoka na temelju metode prigušivanja

Primjenom jednadžbe kontinuiteta na stacionarno strujanje nestlačivog fluida kroz potpuno ispunjen presjek cijevi pokazuje da brzina fluida raste proporcionalno smanjenju presjeka strujanja. S obzirom na tu činjenicu, ako u nekakav cjevovod ugradimo pregradu koja će imati manji presjek za protjecanje fluida od samog cjevovoda, brzina protjecanja kroz pregradu će biti veća nego je brzina u samom cjevovodu. Energetski gledano ovakva pregrada predstavlja jednu vrstu transformatora energije te se zbog nje potencijalna energija fluida jednim dijelom pretvara u kinetičku energiju. Pregrade ovakvog tipa se zovu prigušnice. Stavljanjem mjerila tlaka ispred prigušnice te na samom presjeku prigušnice, vidimo da je došlo do pada tlaka, odnosno da je tlak prije prigušnice veći. Zbog takve razlike tlaka dolazi do povećanja brzine fluida te je na temelju razlike brzine prije i na samoj prigušnici moguće odrediti protok fluida. U sljedećem dijelu ćemo dati pregled nekoliko metoda na temelju prigušivanja: Venturijeva cijev, mlaznica te mjerna prigušnica.

### 2.2.1. Venturijeva cijev

Venturijeva cijev se sastoji od dvije konusne cijevi međusobno spojene suženim dijelom [Slika 2]. Zauzima veliki prostor prilikom ugradnje, međutim pruža veliku točnost, mali pad tlaka, otporna je na abraziju i trošenje.



Slika 2. Venturijeva cijev

Zbog odlične mogućnosti oporavka od pada tlaka, preporuča se korištenje u uvjetima gdje se zahtijeva vrlo mali pad tlaka. Prednji dio Venturijeve cijevi, u koji fluid ulazi, naglo se sužava da bi poslije najužeg dijela blaže divergirao. Zbog toga je prednji dio cijevi kraći od stražnjeg dijela cijevi. Zbog takvih dimenzija, fluid se prilikom protjecanja kroz cijev ne dovodi do vrtloženja, pa nema velikih gubitaka energije. Pad tlaka se mjeri ispred mjesta na kojem fluid utječe u Venturijevu cijev i na mjestu najužeg presjeka. Potrebno je osigurati da protok fluida bude ujednačen kroz cijeli cjevovod, odnosno da je cijeli presjek ispunjen fluidom, radi točnog mjerenja tlaka.

Protok fluida kroz Venturijevu cijev:

$$q_v = C_d \cdot A_2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho \cdot \left[1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4\right]}} \quad (1)$$

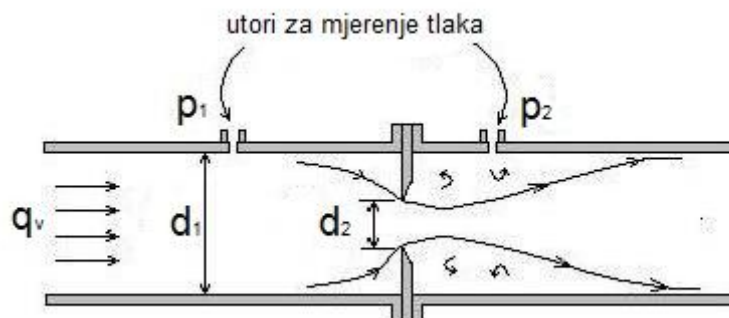
- gdje je:

$q_v$	[m <sup>3</sup> /s]	volumni protok
$C_d$	-	faktor kontrakcije protoka
$A_2$	[m <sup>2</sup> ]	površina najužeg presjeka
$p_1$	[Pa]	tlak prije Venturijeve cijevi
$p_2$	[Pa]	tlak u najužem presjeku
$\rho$	[kg /m <sup>3</sup> ]	gustoća fluida

### 2.2.2. Mjerna prigušnica

Mjerna prigušnica je metalna ploča sa otvorom, najčešće kružnog oblika, za protjecanje fluida, koja se ugrađuje u cjevovod između dva spoja cijevi[Slika 3]. U slučaju promjene protoka može se lako zamijeniti ili probušiti veća rupa.





Slika 3. Mjerna prigušnica

Mjesto najužeg presjeka se zove „vena contracta“, te je na tom mjestu mlaz najuži, brzina najveća, a tlak najmanji. Prigušnica, protjecanjem fluida kroz nju, izaziva poremećaje u strujanju koji se manifestiraju povećanom turbulencijom iza ploče i trajnim gubicima energije. Gubitak energije se očituje kroz pad tlaka koji može biti do 30 %. Podnosi visoke tlakove i temperature, nema nikakvih pokretnih dijelova, te njezina jeftina izrada i mogućnost brze zamjene ukoliko dođe do oštećenja, razlog su velike primjene u praksi.

Maseni protok fluida kroz mjernu prigušnicu:

$$q_m = C_d \cdot A_2 \cdot \sqrt{\frac{2\rho \cdot (p_1 - p_2)}{1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4}} \quad (2)$$

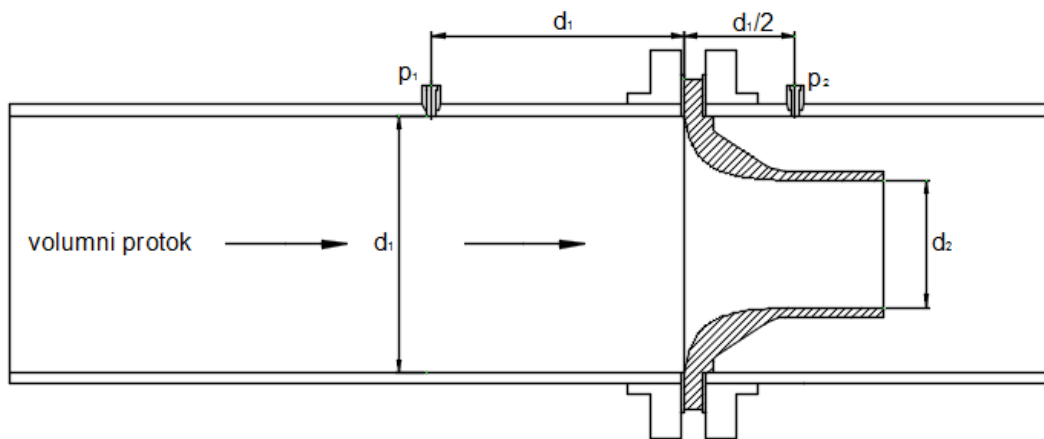
- gdje je:

$q_m$	[kg/s]	maseni protok
$C_d$	-	faktor kontrakcije protoka
$A_2$	[m <sup>2</sup> ]	površina najužeg presjeka
$p_1$	[Pa]	tlak prije prigušnice
$p_2$	[Pa]	tlak u najužem presjeku
$\rho$	[kg /m <sup>3</sup> ]	gustoća fluida

### 2.2.3. Mlaznica

Mlaznice predstavljaju prijelaz između mjerne prigušnice i Venturijeve cijevi. One umjesto otvora na ravnoj ploči imaju blagi, zaobljeni prijelaz koji se izvlači u kraću cilindričnu cijev [Slika 4], te izlazni rub mlaznice mora biti oštar. Zaobljena površina štiti mlaznicu od korozije prema različitim fluidima, osiguravajući tako dugi vijek trajanja mlaznice. Omogućuje mjerenje protoka većeg za 60 – 65 % od protoka kroz mjernu prigušnicu. Većinom se koristi

za mjerenja u cjevovodima manjih dimenzija u kojima struji fluid pod visokim tlakom. Potreban je manji dio ravnog cjevovoda, za ugradnju, prije i poslije mlaznice, nego kod mjerne prigušnice. Ukupni pad tlaka je manji nego kod mjerne prigušnice, međutim veći je nego kod Venturijeve cijevi. Tlak se mjeri ispred i iza pločastog dijela mlaznice, te je točnija nego mjerna prigušnica.



Slika 4. Mlaznica

Protok fluida kroz mlaznicu:

$$q_v = C_d \cdot A_2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho \cdot \left[1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4\right]}} \quad (3)$$

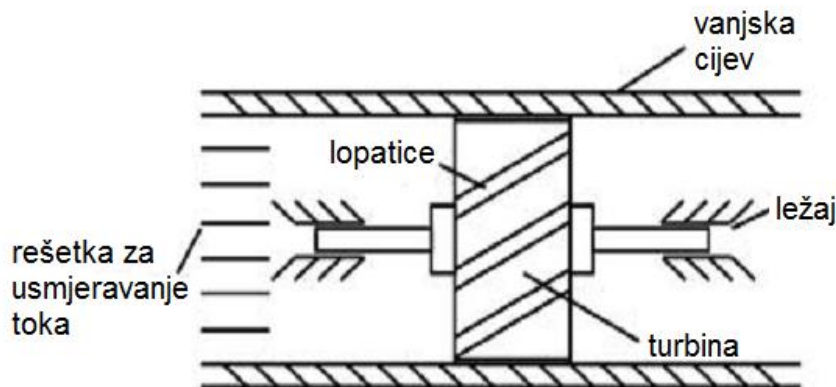
- gdje je:

$q_v$	[m <sup>3</sup> /s]	volumni protok
$C_d$	-	faktor kontrakcije protoka
$A_2$	[m <sup>2</sup> ]	površina presjeka najužeg dijela mlaznice
$p_1$	[Pa]	tlak prije mlaznice
$p_2$	[Pa]	tlak u najužem presjeku
$\rho$	[kg /m <sup>3</sup> ]	gustoća fluida

### 2.3. Turbinska mjerila protoka

Kolo turbine je smješteno aksijalno na ležajevе unutar cijevi [Slika 5]. Strujanje fluida uzrokuje rotiranje kola te se sa kolom istovremeno rotira i permanentni magnet smješten unutar tijela turbine. Jednim okretom kola stvara se jedan impuls napona. U slučaju malih

protoka, impuls napona nije linearan sa protokom, međutim kod velikih protoka odziv je linearan sa frekvencijom rotacije kola turbine.



**Slika 5. Turbinsko mjerilo protoka**

Općenito, volumni protok  $q_v$  se odnosi na frekvencijski impuls preko jednadžbe:

$$q_v = \frac{f}{K} \quad (4)$$

- gdje je:

$q_v$	[m <sup>3</sup> /s]	volumni protok
$f$	[1/s]	frekvencija vrtnje turbinskog kola
$K$	[1/m <sup>3</sup> ]	faktor turbine

Faktor turbine  $K$  dobiva se iz krivulje umjeravanja za određenu turbinu. Ovisan je o parametrima konstrukcije mjerila, protoku i kinematskoj viskoznosti fluida. Za visoku stopu protoka, faktor  $K$  je skoro konstantan za bilo koje mjerilo. Pad tlaka kod najvećeg protoka iznosi oko 0,5 bar.

## 2.4. Ultrazvučni protokomjeri

Ultrazvučni protokomjeri rade na principu odašiljanja i primanja valova u fluidu između predajnika i prijemnika, te određivanje brzine strujanja na temelju razlika u iznosu frekvencije ili vremena prolaza. Prednost ovakvih protokomjera je njihovo postavljanje na cijev s vanjske strane. Nemaju nikakvih pokretnih dijelova te nimalo ne utječu na protok fluida. Mogu se mjeriti različiti fluidi bez obzira na brzinu, temperaturu, viskoznost ili gustoću. Zbog postavljanja s vanjske strane cijevi pogodni su za mjerenje korozivnih, zapaljivih i radioaktivnih fluida. Isto tako je izbjegnuta kontaminacija fluida, pa se iz tog razloga često upotrebljavaju u prehrambenoj industriji.

Temeljem brzina dobivenim mjerenjem pomoću ovih metoda, uz jednadžbu kontinuiteta (5) dobije se volumni protok kroz cijev.

Jednadžba kontinuiteta:

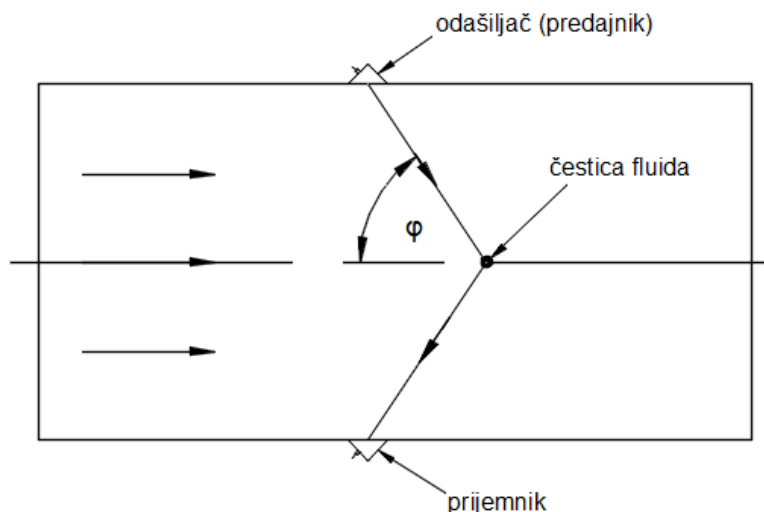
$$q_v = v \cdot A \quad (5)$$

- gdje je:

$q_v$	[m <sup>3</sup> /s]	volumni protok
$v$	[m/s]	brzina fluida
$A$	[m <sup>2</sup> ]	površina presjeka kroz koji struji fluid

### 2.4.1. Ultrazvučni protokomjeri frekvencijskog pomaka

Metoda mjerenja protoka korištenjem ultrazvučnih protokomjera frekvencijskog pomaka se temelji na tome da se ultrazvučni valovi modificiraju, te se mijenja vrijednost frekvencije valova, pod utjecajem fluida kroz koji putuju u cijevi. Sa vanjske strane cijevi se nalaze predajnik (odašiljač) koji emitira ultrazvučne valove i prijemnik sa druge strane cijevi, nasuprot predajnika, koji te valove prima [Slika 6]. Ovisno o iznosima frekvencije znati će se i o smjeru strujanja, što se temelji na Dopplerovom efektu. U ovisnosti o tome da li je frekvencija odašiljača veća od frekvencije koju prima prijemnik, te obratno, iz jednadžbe (6) se vidi da li je brzina pozitivna ili negativna, te da li se fluid kreće u smjeru koji smo pretpostavili.



Slika 6. Ultrazvučni protokomjer frekvencijskog pomaka

Izračun brzine na temelju Dopplerovog efekta:

$$v = \frac{c \cdot (f_0 - f_p)}{2 \cdot f_0 \cdot \cos\varphi} \quad (6)$$

- gdje je:

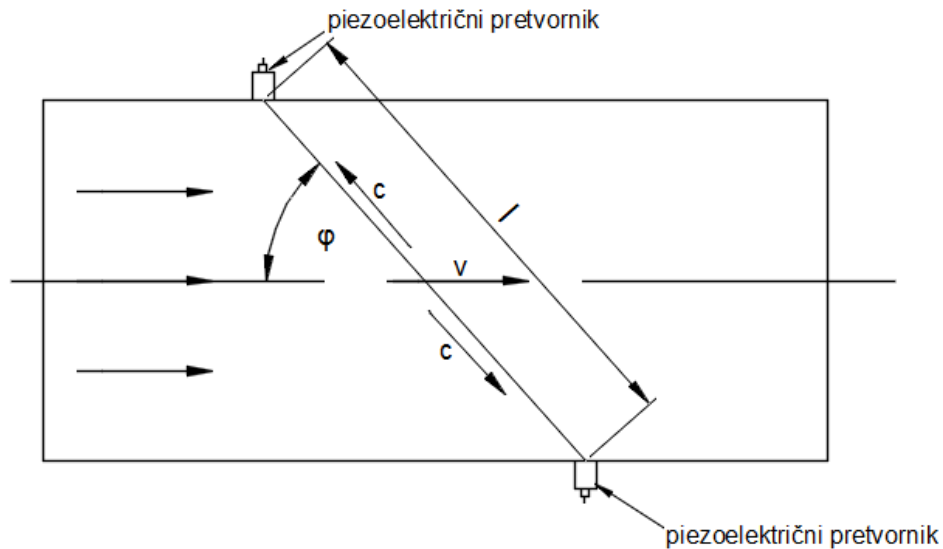
$v$	[m/s]	brzina fluida
$c$	[m/s]	brzina zvuka u fluidu
$f_0$	[1/s]	frekvencija odašiljača
$f_p$	[1/s]	frekvencija prijemnika
$\varphi$	[rad]	kut odašiljanja frekvencije

#### 2.4.2. Ultrazvučni protokomjeri vremena prolaza

Ultrazvučni protokomjeri vremena prolaza omogućuju ugradnju s unutarnje i vanjske strane cijevi, a postavljaju se na mjestu s izobraženim profilom strujanja. Koriste se dva piezoelektrična pretvornika [Slika 7], od kojih svaki odašilje i prima signale, koji su postavljeni na cijev na određenoj udaljenosti. Jedan pretvornik šalje signale u smjeru strujanja fluida dok drugi istovremeno šalje signale u suprotnom smjeru, prema prvome. Razlika u vremenima prolaza između signala je direktno proporcionalna brzini fluida.

Dostupni su u suhoj i mokroj verziji, odnosno mogu biti s vanjske strane cijevi ili unutar cijevi. Mogu biti trajno pričvršćeni na cijevi ili mogu privremeno biti postavljeni na postolje u slučaju da su prijenosni uređaji. Bez obzira na vrstu postavljanja, rade sa svim vrstama fluida, neovisno da li je fluid čist ili kontaminiran, da li je to voda ili ulje. Također se mogu koristiti

na cijevima promjera do 500 cm. Točnost ovakvih protokomjera je unutar 1 %. Za postizanje ovakve točnosti se koriste različite statističke, analitičke i digitalne tehnike analiziranja signala koje isto tako omogućuju automatsko prilagođavanje na vremenske varijacije protoka fluida.



**Slika 7. Princip rada ultrazvučnog protokomjera vremena prolaza**

Računanje razlike u vremenu prolaza:

$$\Delta t = t_u - t_n = \frac{2 \cdot v \cdot l \cdot \cos\varphi}{c^2 - v^2 \cdot \cos\varphi} \quad (7)$$

- gdje je:

$v$	[m/s]	srednja brzina fluida
$c$	[m/s]	brzina zvuka u fluidu
$t_u$	[s]	vrijeme uzvodnog prolaza signala
$t_n$	[s]	vrijeme nizvodnog prolaza signala
$\varphi$	[rad]	kut odašiljanja frekvencije
$\Delta t$	[s]	razlika vremena uzvodnog i nizvodnog prolaza signala
$l$	[m]	dužina prolaza (razmaka između pretvornika)

### 3. GRAVIMETRIJSKA MJERNA METODA

Gravimetrijska mjerna linija sastoji se od vage, pumpe za vodu, ispitne klupe, magnetno - induktivnih protokomjera (MID), cjevovoda i spremnika. Voda iz spremnika teče kroz cjevovod na ispitnu klupu sa mjerilima koja mjere protok vode. Prolaskom kroz mjerilo voda odlazi u spremnik na mjernoj vagi. Pomoću vage se određuje točna masa vode koja je protekla kroz mjernu liniju. Uz pomoć mase vode određuje se volumni protok te se uspoređuje sa rezultatima protoka koji su dobiveni na mjerilu.

U ovome radu ćemo opisati dvije mjerne linije koje rade na principu gravimetrijske metode, a koja se nalaze u Laboratoriju za procesna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Mjerne linije koje će se opisati su mjerna linija proizvođača Actaris, tip RAC 2200/1/5-AG-EH i mjerna linija proizvođača JUSTUR, tip MT 10/15-40.

#### 3.1. Mjerna linija Actaris RAC 2200/1/5-AG-EH

##### 3.1.1. Opis mjerne linije

Automatska ispitna klupa za protokomjere [Slika 8], koja omogućava provjeru temperature i volumena vode kroz vodna mjerila koristeći start/stop metodu ili metodu letećeg starta, sa maksimalnim protokom do 5 m<sup>3</sup>/h. Ispitna klupa omogućava provjeru mjerila promjera 15 mm, 20 mm i 25 mm, serijski spojenih u jednu liniju za protokomjere. Provjera mjerila obavlja se automatski pomoću računala koje upravlja svim funkcijama opreme i obavještava rukovaoca o obavljenim radnjama. Nakon ispitivanja su automatski dobivene greške mjerila. Ispitivanja se mogu obaviti preko metode letećeg starta ili start/stop metode ovisno o tipu ispitivanja, odnosno da li je ispitivanje volumena ili energije, i modelu mjerila.

Kod ispitivanja se mogu koristiti dva etalona volumena, vaga do 150 kg ili magnetno - induktivna mjerila protoka, koja odabire rukovatelj prema ispitnim karakteristikama (potrebna točnost mjerenja, ispitni volumen, ...). U slučaju provođenja ispitivanja energije, za korištenje su predviđene dvije toplinske kupke sa ispitnom klupom, u koje se uranjaju mjerila temperature zajedno sa etalomom temperature. Kontrola cijelog sustava i dobivanje podataka se obavlja preko računala koje isto tako omogućuje da se ti podaci obrađuju, spremaju i ispisuju.



**Slika 8. Ispitna klupa**

Sustav je sastavljen od pumpe za vodu sa mogućnošću kontrole brzine vrtnje, koja omogućuje protok vode kroz ispitivana mjerila. Dobivanje programiranog protoka vode se može dobiti i sa dvije nezavisne regulirane linije za protok, kojima se upravlja preko elektronski upravljanim regulacijskim ventilima. Stvarni protočni volumen određuje se sa dva nezavisna referentna magnetno – induktivna mjerila protoka.

Voda, nakon prolaska kroz ispitnu klupu, odlazi na platformu u vagu sa skalom do 150 kg. Ova vaga se koristi kao glavni etalon volumena kod ispitivanja mjerila, te kao etalon kod umjeravanja magnetno – induktivnih mjerila protoka. U oba slučaja volumen se određuje preko skale koja mjeri masu i gustoće vode prema trenutnoj temperaturi. Pokraj vage se nalazi prekidač spojen na troputni ventil koji usmjerava nadolazeću vodu sa ispitne klupe na vagu za mjerenje ili u odvod.





**Slika 9. Platforma sa vagon**

Za provjeru mjerila mogu se koristiti dvije referentne metode za mjerenje volumena:

- Gravimetrijska metoda: Umjeravanje ispitivanih mjerila se radi usporedbom volumena dobivenih na pojedinom mjerilu sa referentnim volumenom dobivenim na vagi sa skalom. Računalo očitava masu vode na vagi i uz pomoć gustoće vode dobiva se volumen vode. Ovom metodom se dobiva precizna provjera mjerila.
- Magnetno – induktivna mjerila protoka (MID): Ispitivana mjerila se direktno uspoređuju sa volumenom dobivenim na MID-ovima koji su prethodno umjereni preko vage sa skalom. Ispitivanje ovom metodom je manje točno nego gravimetrijska metoda

Referentna vrijednost energije se dobiva iz odabrane referentne metode za mjerenje volumena i standardnog referentnog sustava za temperaturu.

Za očitavanje vrijednosti ispitivanih mjerila mogu se koristiti dvije metode:

- Metoda letećeg starta: Očitavanja mjerila se očitavaju preko emitiranih impulsa (samo u slučaju mjerenja volumena) ili preko serijske komunikacije (ako su mjerila opremljena odgovarajućim funkcijama), te se rezultati uspoređuju sa referentnim volumenom. U ovoj metodi se koristi prekidač koji zaustavlja protok jer su tijekom ispitivanja mjerila cijelo vrijeme uključena.

- Start/stop metoda: Očitavanje mjerila se unosi u računalo preko tipkovnice, ručnog terminala ili serijske komunikacije, te je zatim očitavanje mjerila uspoređeno sa referentnim vrijednostima volumena i energije. Tijekom ove metode su mjerila zaustavljena radi unošenja vrijednosti očitavanja u računalo.

Za periodičko umjeravanje vage se koristi referentna masa od 50 kg instalirana na ispitnu klupu, a smještena na mehaničku konstrukciju pokraj vage. Umjeravanje se automatski provodi preko softvera kada rukovatelj odabere odgovarajuću opciju. Umjeravanje vage se može obaviti i preko referentne mase od 2 kg koja se ručno stavlja na vagu.

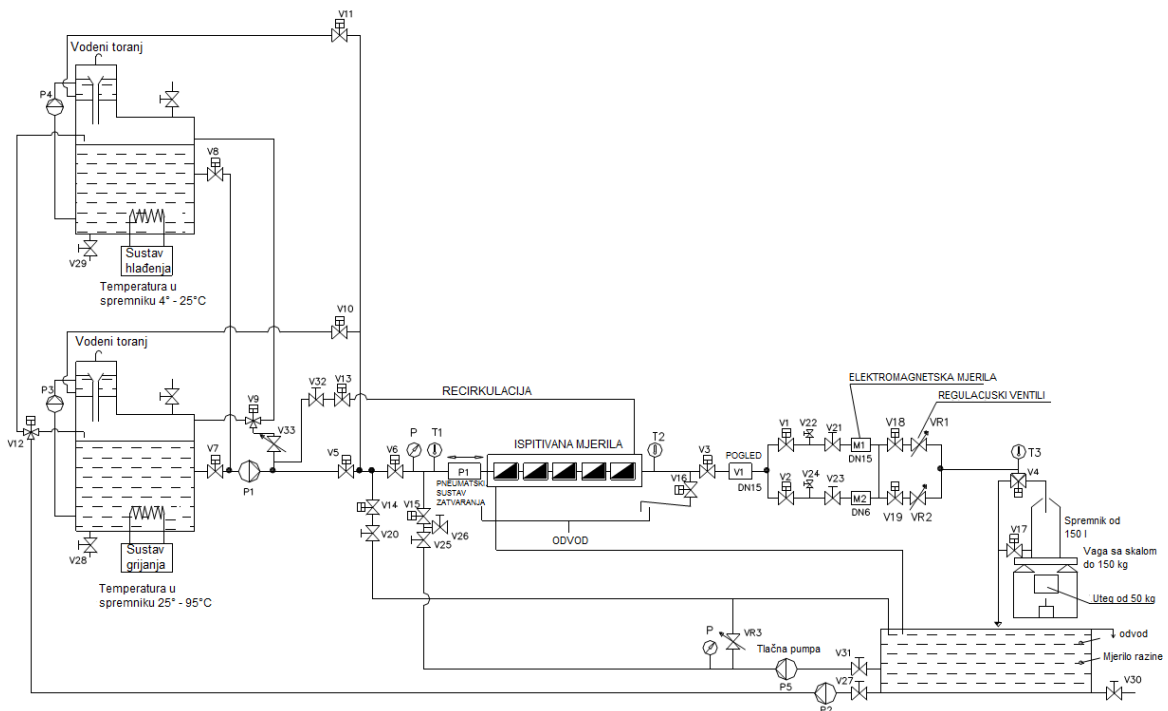
Elektronički sustav podataka omogućuje dobivanje tlaka unutar cjevovoda kao i temperature vode tijekom mjerenja. Također se koristi i precizni indikator temperature da se dobije referentna temperature tople kupke za dobivanje referentne vrijednosti energije tijekom ispitivanja toplinske energije.

Cirkulacijski krug vode je zatvoren te su zbog toga, tijekom ispitivanja, gubici vode svedeni na minimum. Za potrebe ispitivanja postoje dva spremnika vode po 1000 litara, od kojih je jedan sa toplom vodom dok je drugi sa hladnom, te ovisno prema potrebama mjerenja se odabire topla ili hladna voda. Voda se preko pumpe za vodu odvodi kroz cjevovod do ispitne klupe sa mjerilima, te se nakon obavljenih ispitivanja vraća natrag u spremnik iz kojeg je uzeta. Sustav za grijanje vode se nalazi u toplom spremniku, kontroliran termostatom preko kojeg se određuje željena temperatura vode u spremniku. Jedinica za hlađenje vode je spojena na hladni spremnik za potrebe smanjenja temperature vode do željene temperature postavljene na kontrolnoj ploči jedinice za hlađenje.

Svi dijelovi mjerne linije, cjevovod i spremnici, su toplinski izolirani radi što većeg smanjenja toplinskih gubitaka tijekom ispitivanja.

### 3.1.2. Mjeriteljski opis

#### 3.1.2.1. Tok vode



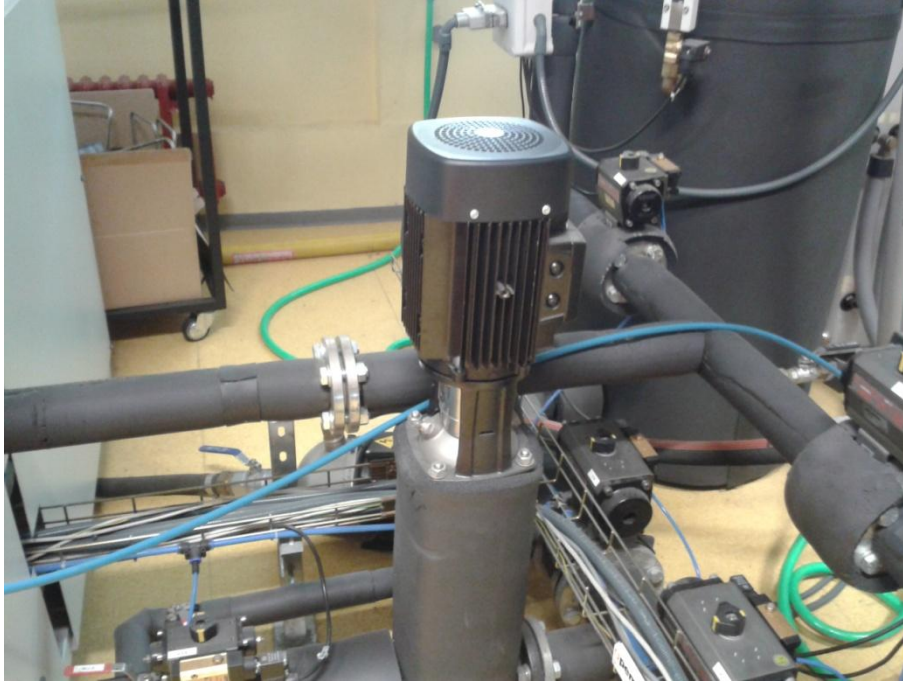
**Slika 10. Prikaz toka vode kroz mjernu liniju**

Prema slici [Slika 10] je vidljivo da je to zatvoreni tok vode, a voda koja se koristi za ispitivanje odabire se iz odgovarajućeg toplog ili hladnog spremnika, te se nakon obavljenog ispitivanja vraća u isti spremnik. Potrebna voda za obavljanje ispitivanja uzima se iz jednog od dva spremnika od 1000 litara, ovisno o tome da li je za potrebe ispitivanja potrebna topla ili hladna voda.

Sustav za grijanje vode je ugrađen u topli spremnik s ciljem grijanja vode do temperature određene od strane rukovaoca. Sustav za hlađenje se nalazi pokraj spremnika hladne vode s ciljem hlađenja vode do određene temperature.

Pumpa za vodu P1 [Slika 11] se koristi za dobavljanje vode iz spremnika do ispitne klupe na kojima su mjerila.

Vodeni toranj, odnosno povišenje iznad svakog spremnika omogućuje da se umjesto pumpe za vodu koristi gravitacija pomoću koje voda sama od sebe teče kroz mjernu liniju. Ovaj način se koristi u slučaju da se žele postići mali protoci kroz mjernu liniju te su tako izbjegnute moguće turbulencije koje može izazvati pumpa kod malih protoka. Male pumpe za vodu P3 i P4 omogućuju da se napuni potrebni vodeni toranj, ovisno da li trebamo hladnu ili toplu vodu.



**Slika 11. Pumpa za dobavljanje vode iz spremnika**

Nakon prolaska kroz mjerila na ispitnoj klupi, voda odlazi na vagu sa skalom da bi se odredila točna masa protočne vode, te se usporedila sa rezultatom na ispitivanim mjerilima.

M1, nazivnog promjera DN 15, i M2, nazivnog promjera DN 6, su magnetno – induktivna mjerila protoka koja mogu služiti kao referentne vrijednosti volumena. Razlika između njih je u mjernom području mjerenja, odnosno svaki pokriva različiti opseg protoka.



**Slika 12. Topli i hladni spremnik vode**

### 3.1.2.2. Vrste ispitivanja

Na ovoj mjernoj liniji se mogu obavljati dvije vrste ispitivanja:

- Mjerenje volumnog protoka: Ispitivanja za utvrđivanje pogrešaka kod mjerila prilikom mjerenja volumnog protoka
- Mjerenje toplinske energije: Ispitivanja za dobivanje pogrešaka kod mjerenja toplinske energije.

Navedene vrste ispitivanja se mogu obaviti primjenjujući dvije vrste metoda:

- Start/stop metoda: Na početku mjerenja, mjerila su ugašena radi očitavanja početnih vrijednosti. Nakon provedenih ispitivanja, mjerila se ponovno gase radi očitavanja konačnih vrijednosti. Oba očitavanja se uspoređuju sa referentnim vrijednostima na ispitnoj klupi radi dobivanja pogreške mjerila
- Metoda letećeg starta: Mjerila su tijekom ispitivanja konstantno u radu, te se odgovarajućim metodama očitavaju vrijednosti u trenutku kada započinje mjerenje i na kraju mjerenja.

Za referentni volumen koji se uspoređuje sa rezultatima dobivenim na mjerilima može se koristiti vaga sa skalom ili magnetno – induktivna mjerila. U slučaju korištenja vage sa skalom, voda, nakon prolaska kroz mjerila na ispitnoj klupi, odlazi na vagu koja mjeri njezinu masu te se dobiva referentni volumen. U slučaju da se koriste MID-ovi, voda prolazi kroz njih odmah nakon prolaska kroz mjerila na ispitnoj klupi te oni odašilju impulse na elektroničko sučelje koji odgovaraju referentnom volumenu.

Tijekom ispitivanja sustav za prikupljanje podataka očitava temperaturu i tlak vode, te se pogreška mjerenja određuje na sljedeći način:

$$\rho_{\text{vode}} = f(\text{temperatura vode, tlak vode})$$

$$V_{\text{referentni}} = f(\rho_{\text{vode}}, \text{raspon skale na vagi}, \rho_{\text{zraka}}) - \text{u slučaju korištenja vage sa skalom}$$

$$V_{\text{referentni}} = f(\text{brojač impulsa na MID} - u, \text{vrijednost impulsa na MID} - u) - \text{u slučaju korištenja jednog od elektromagnetskih mjerila}$$

$$V_{\text{mjerila}} = f(\text{početno očitavanje, konačno očitavanje})$$

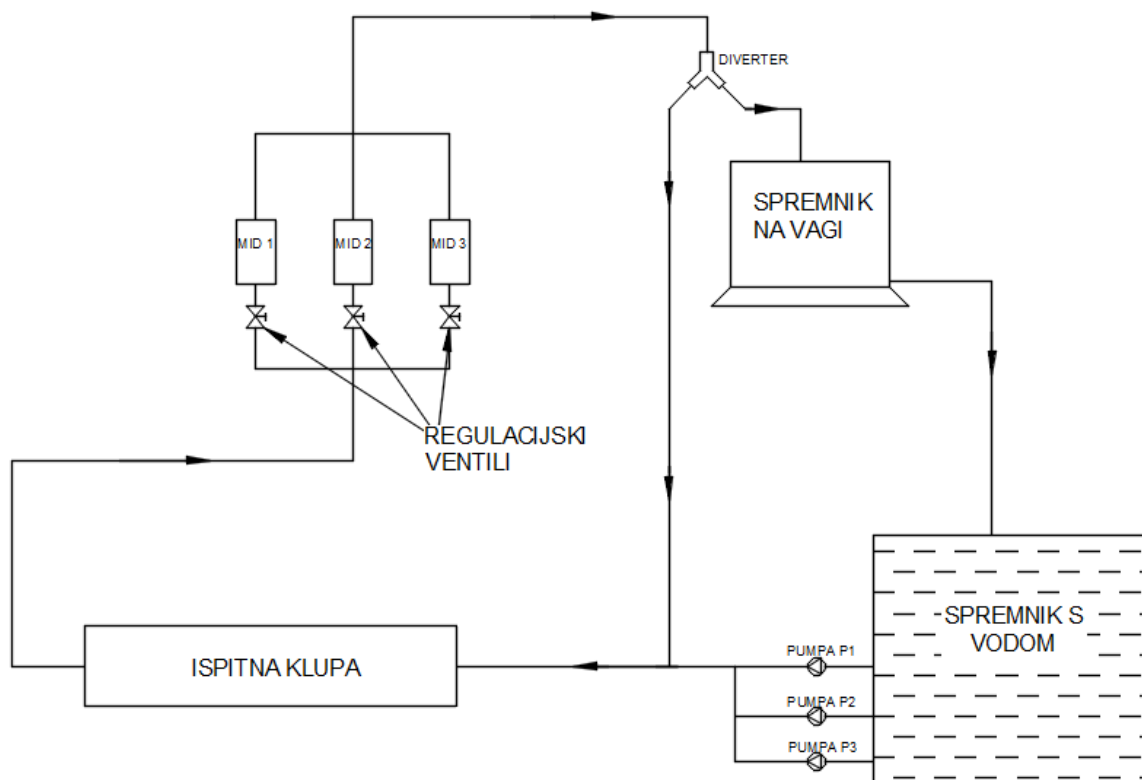
$$\text{Pogreška (\%)} = \frac{V_{\text{mjerila}} - V_{\text{referentni}}}{V_{\text{referentni}}} \cdot 100$$

### 3.2. Mjerna linija JUSTUR MT 10/15-40

Mjerna linija MT 10/15-40 je namijenjena umjeravanju protokomjera sa hladnom ili toplom vodom između protoka  $0,006 - 9 \text{ m}^3/\text{h}$ . Prilikom umjeravanja se koristi metoda mirnog starta ili metoda letećeg starta.

#### 3.2.1. Opis mjerne linije

Mjerna linija sastoji se od spremnika zapremnine 190 litara koji je napunjen vodom, tri pumpe za vodu, tri magnetno – induktivna mjerila protoka (MID) sa pripadajućim ventilima, ispitne klupe, divertera i posude na vagi. Na ispitnoj klupi se mogu ispitivati mjerila do nazivnog promjera DN 40 mm.



Slika 13. Shema mjerne linije

Umjeravanje mjerila se može obaviti s toplom ili hladnom vodom. Prije ispitivanja, mjerila se serijski spajaju na ispitnoj klupi i cijela linija se puni vodom iz spremnika, sa malim protokom, s ciljem ozračivanja linije. Nakon punjenja linije, započinje mjerenje. Mjerenje se obavlja sa tri različita protoka a to su nominalni protok, 10 % nominalnog protoka i minimalni protok koji iznosi 1 % nominalnog protoka. Protoci se namještaju preko softvera na računalu, prema karakteristikama mjerila, odnosno prema tome koliki protok kroz koje mjerilo može proći.

Postoje tri pumpe za vodu zbog mogućnosti odabira tri različita protoka. Svaka pumpa dobavlja jedan namješteni protok te je cjevovodom spojena na MID mjerila koja mjere volumni protok. Ispod MID-ova se nalaze regulacijski ventili [Slika 20] koji se zatvaraju i otvaraju prema potrebi, odnosno prema tome koliki protok treba proći kroz mjernu liniju. Ti ventili omogućuju da protok ide kroz samo jednu cijev, te kroz jedan MID dok su ostala dva zatvorena te kroz njih nema protoka. Nakon što je završeno početno punjenje mjerne linije vodom, ventili zatvaraju protok, te magnetska mjerila sa svojim ventilima namještaju zatvorenost cjevovoda ovisno prema protoku. Nakon što je preko MID-a namješten protok, slijedi daljnje mjerenje.

Diverter se koristi kod metode letećeg starta za preusmjeravanje toka vode sa cirkulacije kroz ispitnu klupu u spremnik na vagi.

Maksimalni radni tlak koji može biti u mjernoj liniji je 10 bar, dok je radna temperatura između 10 i 65 °C.

Za ispitivanje protokomjera se koriste dvije metode, metoda letećeg starta i metoda mirnog starta.

Kod metode letećeg starta, nakon određenog vremena i početnog punjenja linije, pomoću ventila se preusmjerava tok vode, poslije ispitne klupe, preko MID-ova, u posudu na vagi. Početna i završna očitavanja mjerila se obavljaju automatski preko elektronike. Usporedbom očitavanja na mjerilima i dobivenog volumena vode preko vage se određuje pogreška na mjerilima.

Kod rada sa metodom mirnog starta također postoji početno punjenje linije radi ozračivanja. Nakon punjenja se zatvaraju ventili kako bi se voda zadržala u mjernoj liniji. Slijedi stavljanje vrijednosti sa mjerilima na nulu, te se nakon toga otvaraju ventili i slijedi ispitivanje. Voda, prolaskom kroz mjernu liniju, odlazi u posudu na vagi kako bi se dobila masa vode koja je prošla kroz mjerila. Na temelju mase vode dobiva se njezin volumen, te usporedbom sa rezultatima na mjerilima vidi se da li mjerila zadovoljavaju i izračunava se pogreška.

## 4. OPIS MJERENJA

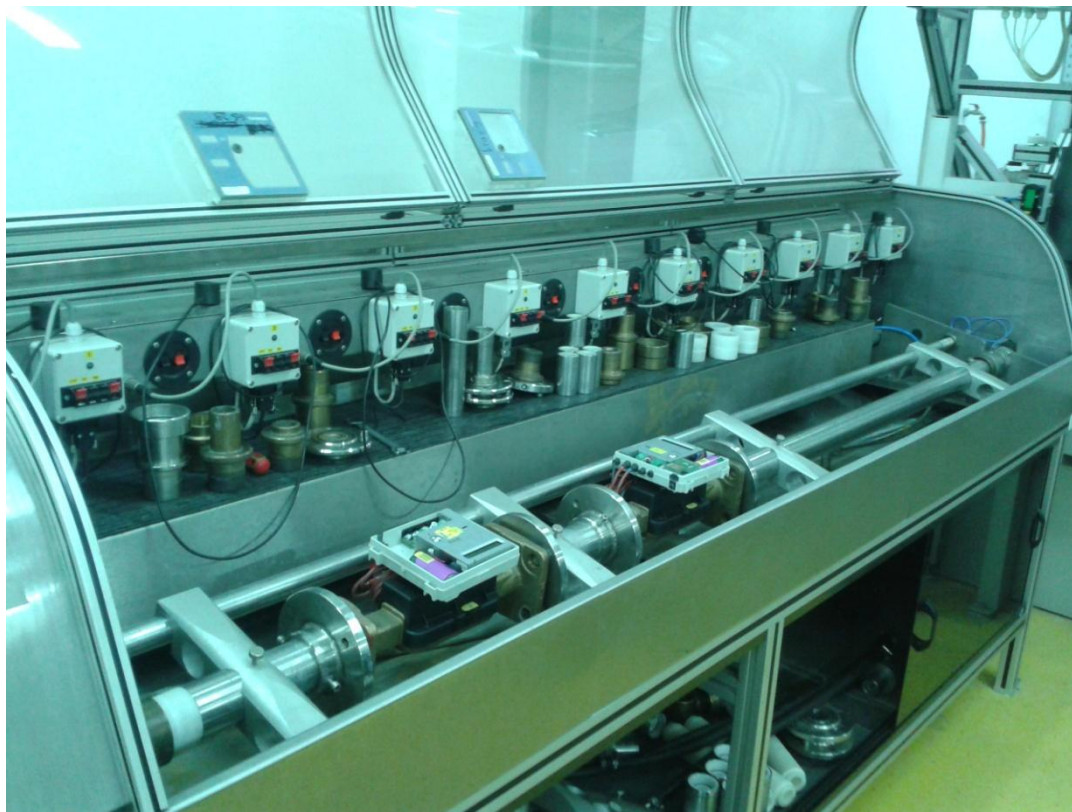
U ovome poglavlju dati ćemo opis procesa mjerenja na mjernoj liniji JUSTUR MT 10/15-40 i pregled ključnih dijelova mjerne linije. Mjerenje se temelji na gravimetrijskog mjernoj metodi koja je opisana u prethodnom poglavlju.

Mjerenje je provedeno na dva kalorimetra te su rezultati, očitani na njima, uspoređeni sa rezultatima dobivenima preko mase i volumena vode koja je prošla kroz mjernu liniju.

Za potrebe mjerenja je korištena voda bila na temperaturi od 50°C.

### 4.1. Tijek procesa mjerenja

Prije samog početka mjerenja odabrana su dva kalorimetra, nazivnog promjera DN 40 mm, koji su bili korišteni kao mjerila. Spojeni su serijski na ispitnu klupu te su pomoću hidrauličkog mehanizma učvršćeni.



**Slika 14. Ispitna klupa sa kalorimetrima**

Nakon što je sve spojeno i učvršćeno, linija je puštena u rad. Prvo je slijedilo sporo punjenje cjelokupne linije sa vodom. Nakon što je cijela linija napunjena, ventili su onemogućili povrat



vode u spremnik, te je sve zaustavljeno. Pri tome je utvrđeno da linija nigdje ne propušta i da je sve dobro priključeno.

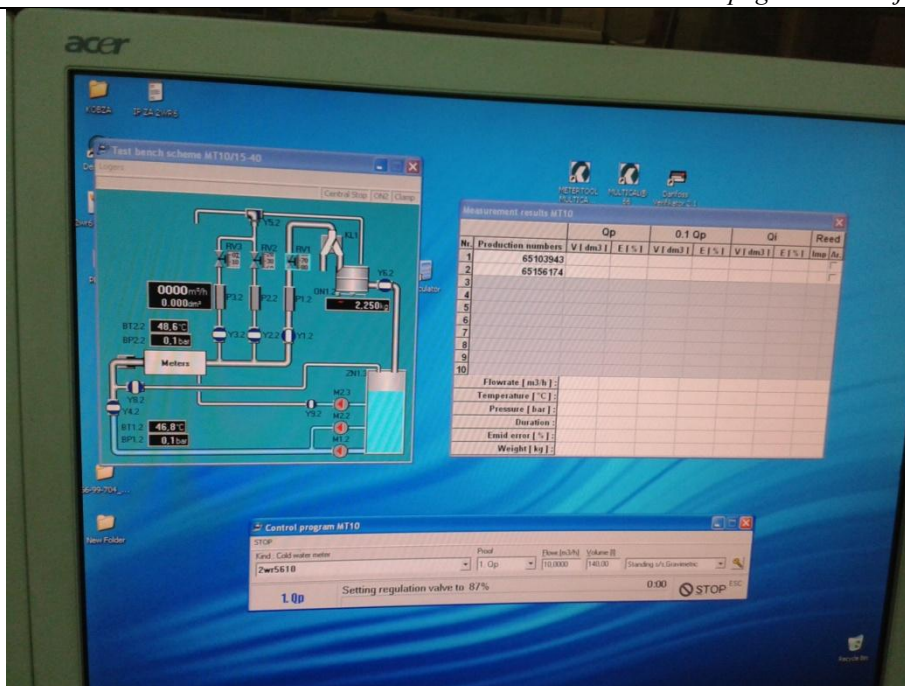
Prije početka mjerenja stavljene su vrijednosti na kalorimetrima na nulu i od te vrijednosti je počelo mjerenje. Preko softvera na računalu se upravlja cijelom linijom, namješta se željeni protok vode te se liniju pušta u rad.



Slika 15. Kolorimetar 1



Slika 16. Kolorimetar 2

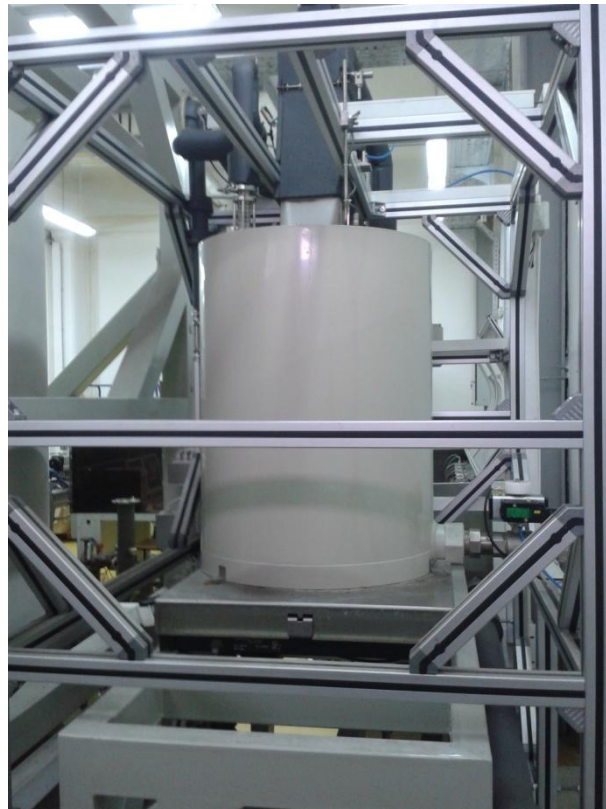


**Slika 17. Izgled softvera na računalu**

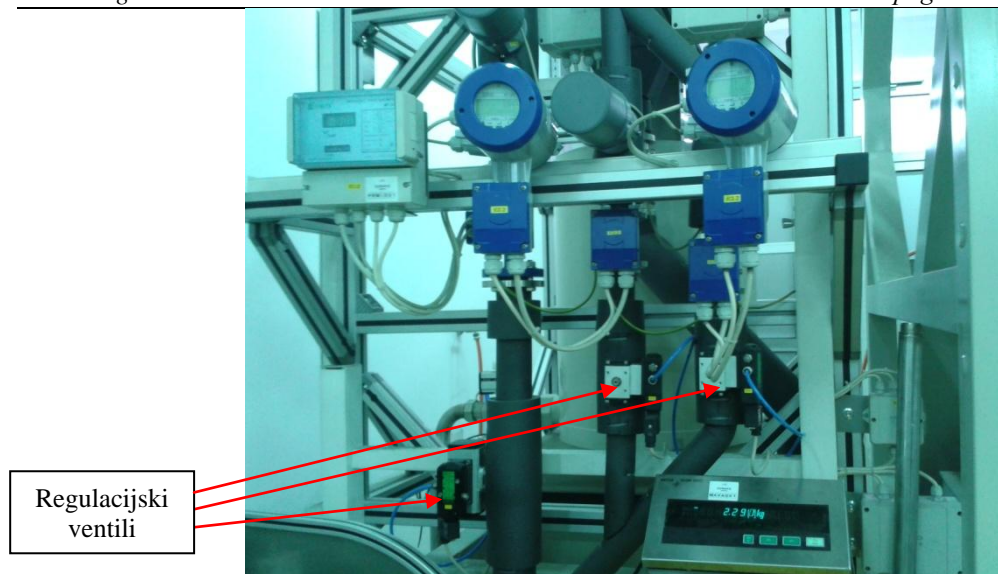
Nakon pokretanja preko softvera, pumpe za vodu su počele sa radom. Voda je krenula iz spremnika kroz ispitnu klupu sa mjerilima, preko MID-a u spremnik na vagi. Kada je MID registrirao da je kroz njega prošao nominalni protok, zaustavljen je rad pumpe i zatvorili su se ventili. Očitani su rezultati na kalorimetrima i uneseni su u softver. Te vrijednosti su korištene kao vrijednosti dobivene nakon prvog mjerenja te su korištene kao početne vrijednosti u sljedećem mjerenju. Softver je zabilježio kolika je masa vode na vagi te je preračunao u volumen i dobiveni su rezultati mjerenja. Zatim je ponovo pokrenuto mjerenje za sljedeći protok koji je iznosio 10 % nominalnog protoka. Postupak mjerenja je bio jednak prethodno opisanom. Nakon drugog mjerenja, linija je puštena u rad još jedanput za sljedeći protok koji je iznosio 1 % nominalnog protoka. Nakon obavljena sva tri mjerenja, preko softvera su automatski dobiveni rezultati sa pripadajućom pogreškom pojedinog mjerenja.



**Slika 18. Spremnik s vodom**



**Slika 19. Spremnik na vagi**



**Slika 20. Magnetno induktivni protokomjeri (MID)**

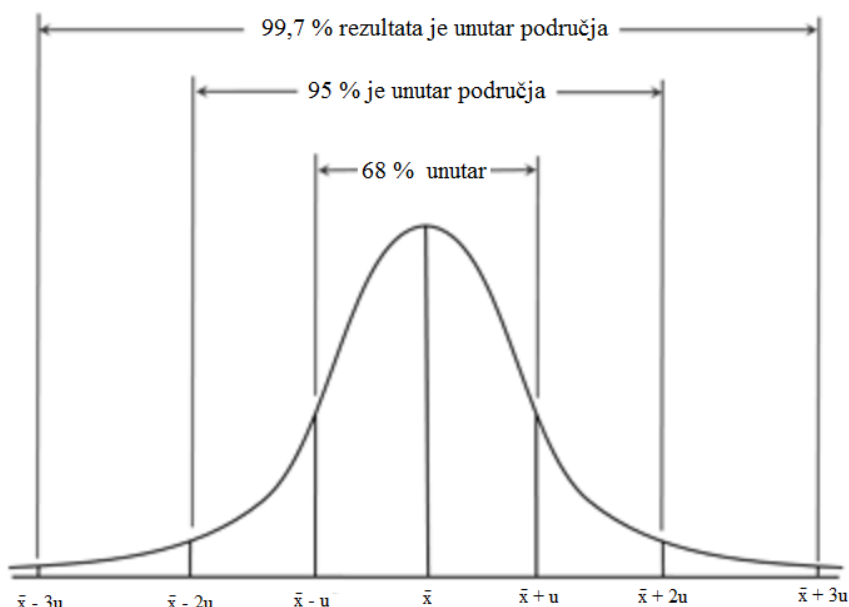
Nakon obavljenih mjerenja, voda iz linije je puštena natrag u spremnik, te je u cijeloj liniji normaliziran tlak. Zatim je otpušten hidraulički mehanizam i kalorimetri su maknuti sa ispitne klupe.

## 5. MJERNA NESIGURNOST

Poznato je da je nemoguće točno izmjeriti neku veličinu. Mjerenjima se samo možemo dobro ili loše približiti. Razliku između dobivenih rezultata i stvarnih vrijednosti, odnosno odstupanje od stvarne vrijednosti, iskazujemo kroz mjernu nesigurnost rezultata. U ovome poglavlju ćemo opisati kako se izračunava mjerna nesigurnost te prikazati mjernu nesigurnost za naša mjerenja.

### 5.1. Mjerna nesigurnost tipa A i tipa B

Pogreške kod mjerenja mogu biti grube, sustavne i slučajne. Grube pogreške su pogreške mjeritelja i one se ne ubrajaju u mjernu nesigurnost. Trebaju se izbjeći pažljivim radom, dobrim odabirom metode i čestim provjerama. Sustavne pogreške se javljaju zbog nesavršenosti instrumenata, njihovih elektronički sklopova ili skale očitavanja ukoliko se radi o analognim instrumentima. Slučajne pogreške se, međutim, pojavljuju kod svakog mjerenja i nisu rezultat utjecaja mjeritelja. Njih dobivamo iz statističke raspodjele rezultata, odnosno iz više puta ponovljenih mjerenja. Takav način procjene mjerne nesigurnosti je metoda procjene tipa A. Za podatke dobivene statistički metodom A, standardna nesigurnost se računa iz standardne devijacije za sve podatke dobivene mjerenjem. Takav način obrade podataka, za veliki broj ponavljanja, podvrgava se Gaussovoj ili normalnoj razdiobi, gdje su podaci grupirani oko srednje vrijednosti.



Slika 21. Gaussova razdioba

Prema slici [Slika 21] je vidljivo da je Gaussova razdioba za potrebe određivanja mjerne nesigurnosti podijeljena u tri dijela. Svaki dio nam govori kolika je vjerojatnost pojavljivanja rezultata u izračunatim granicama. Osnovni pojas između  $\pm u$  od srednje vrijednosti nam daje vjerojatnost od 68 % da je rezultat u tim granicama. Za veće vjerojatnosti je potrebno izračunati rezultat pomnožiti sa 2 da se dobije vjerojatnost od 95 % ili sa 3 za 99,7 %.

Mjernu nesigurnost tipa A računamo iz standardne devijacije aritmetičke sredine prema formuli:

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n - 1)}} \quad (8)$$

- gdje je:

$u$	[ovisno o mjerenju]	mjerna nesigurnost
$n$	-	broj ponovljenih mjerenja
$x_i$	[ovisno o mjerenju]	vrijednost rezultata kod pojedinog mjerenja
$\bar{x}$	[ovisno o mjerenju]	srednja vrijednost rezultata
$s$	-	standardna devijacija

Procjene mjerne nesigurnosti tipa B su procjene bazirane na drugim informacijama. Baziraju se na prethodnom iskustvu, iz vanjskih umjernica, iz proizvođačkih specifikacija ili proračuna. Ako mjernu nesigurnost uzimamo iz vanjskih umjernica, moramo je podijeliti sa faktorom pokrivanja koji iznosi  $K=2$ , budući da je tamo izražena kao proširena nesigurnost. Kod računanja nesigurnosti metodom B, poznat nam je samo interval nesigurnosti u kojem će vjerojatno biti prava vrijednost, te se takva razdioba naziva pravokutna. Standardna nesigurnost za takav tip mjerenja računa se tako da se polu-interval nesigurnosti podijeli sa faktorom  $\sqrt{3}$ .

Kod računanja složene mjerne nesigurnosti potrebno je sve sastavnice pretvoriti u iste mjerne jedinice, ako imamo više izvora mjerne nesigurnosti. Složena standardna mjerna nesigurnost računa se kao korijen iz sume kvadrata nesigurnosti iz svakog pojedinog izvora:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots} \quad (9)$$

Proširena mjerna nesigurnost se izračunava tako da se kombinirana mjerna nesigurnost pomnoži sa faktorom prekrivanja (najčešće on iznosi  $k=2$ ):

$$U = k \cdot u_c \quad (10)$$

## 5.2. Mjerna nesigurnost mjerne linije JUSTUR MT 10/15-40

Nesigurnost mjerne linije se određuje za tri slučaja:

- kod nominalnog protoka  $Q_p$ , koji iznosi 140 kg vode koja je prošla kroz ispitnu klupu
- kod 10 % nominalnog protoka  $0,1Q_p$ , koji iznosi 40 kg vode
- i kod minimalnog protoka  $Q_i$ , koji iznosi 5 kg vode

Kod procjene mjerne nesigurnosti za našu liniju od najveće je važnosti temperatura vode, jer ona direktno utječe na gustoću vode, pa tako i na masu vode. Mjerna nesigurnost je izračunata za temperaturu vode od 50°C na kojoj je bila prilikom mjerenja.

Proširena mjerna nesigurnost je izračunata sa faktorom prekrivanja  $k = 2$ .

**Tablica 1. Mjerna nesigurnost kod nominalnog protoka  $Q_p$**

Tip	Izvor nesigurnosti	Simbol	Procjena	Nesigurnost	Razdioba	Koeficijent	Doprinos
A	Očitavanje etalona	$m_S$	140,0000 kg	0,0030 kg	normalna (1u)	0,00101 $m^3/kg@m_S$	0,0030 $dm^3$
B	Umjeravanje etalona	$\delta m_S$	0,000 kg	0,0031 kg	normalna (2u)	0,00101 $m^3/kg@m_S$	0,0016 $dm^3$
	Drift etalona	$\delta m_D$	0,000 kg	0,0010 kg	pravokutna	0,00101 $m^3/kg@m_S$	0,0006 $dm^3$
	Rezolucija	$\delta m_R$	0,000 kg	0,0010 kg	pravokutna	0,00101 $m^3/kg@m_S$	0,0006 $dm^3$
	Gustoća vode	$\rho_w$	988,10 $kg/m^3$	0,0580 $kg/m^3$	pravokutna	0,00101 $m^3/kg@m_S$	0,0339 $dm^3$
A i B	Volumen vode	$V_w$	0,1417 $m^3$	Standardna nesigurnost (1u)			0,0340715 $dm^3$
Proširena nesigurnost U (k=2)							0,068143 $dm^3$

Tablica 2. Mjerna nesigurnost kod 10 % nominalnog protoka  $Q_p$ 

Tip	Izvor nesigurnosti	Simbol	Procjena	Nesigurnost	Razdioba	Koeficijent	Doprinos
A	Očitavanje etalona	$m_S$	40,0000 kg	0,0030 kg	normalna (1u)	0,00101 $m^3/kg@m_S$	0,0030 $dm^3$
B	Umjeravanje etalona	$\delta m_S$	0,000 kg	0,0021 kg	normalna (2u)	0,00101 $m^3/kg@m_S$	0,0011 $dm^3$
	Drift etalona	$\delta m_D$	0,000 kg	0,0020 kg	pravokutna	0,00101 $m^3/kg@m_S$	0,0012 $dm^3$
	Rezolucija	$\delta m_R$	0,000 kg	0,0010 kg	pravokutna	0,00101 $m^3/kg@m_S$	0,0006 $dm^3$
	Gustoća vode	$\rho_w$	988,10 $kg/m^3$	0,0580 $kg/m^3$	pravokutna	0,00101 $m^3/kg@m_S$	0,0339 $dm^3$
A i B	Volumen vode	$V_w$	0,0405 $m^3$	Standardna nesigurnost (1u)			0,034067 $dm^3$
Proširena nesigurnost U (k=2)							0,068134 $dm^3$

Tablica 3. Mjerna nesigurnost kod minimalnog protoka  $Q_i$ 

Tip	Izvor nesigurnosti	Simbol	Procjena	Nesigurnost	Razdioba	Koeficijent	Doprinos
A	Očitavanje etalona	$m_S$	5,0000 kg	0,0030 kg	normalna (1u)	0,00101 $m^3/kg@m_S$	0,0030 $dm^3$
B	Umjeravanje etalona	$\delta m_S$	0,000 kg	0,0025 kg	normalna (2u)	0,00101 $m^3/kg@m_S$	0,0013 $dm^3$
	Drift etalona	$\delta m_D$	0,000 kg	0,0010 kg	pravokutna	0,00101 $m^3/kg@m_S$	0,0006 $dm^3$
	Rezolucija	$\delta m_R$	0,000 kg	0,0010 kg	pravokutna	0,00101 $m^3/kg@m_S$	0,0006 $dm^3$
	Gustoća vode	$\rho_w$	988,10 $kg/m^3$	0,0580 $kg/m^3$	pravokutna	0,00101 $m^3/kg@m_S$	0,0339 $dm^3$
A i B	Volumen vode	$V_w$	0,0051 $m^3$	Standardna nesigurnost (1u)			0,034059 $dm^3$
Proširena nesigurnost U (k=2)							0,068118 $dm^3$



## 6. REZULTATI MJERENJA

Mjerenja su provedena na dva kalorimetra, dok su referentne vrijednosti volumena dobivene gravimetrijskom metodom preko računalnog softvera.

**Tablica 4. Podaci o kalorimetrima**

Broj:	Kalorimetar 1	Kalorimetar 2
Proizvođač:	Siemens	Siemens
Model:	2WR5610	2WR5610
Tvornički broj:	65103943	65156174
Nominalni protok $Q_p$ [m <sup>3</sup> /h]:	10	10
Minimalni protok $Q_i$ [m <sup>3</sup> /h]:	0,1	0,1

**Tablica 5. Vrijednosti stvarnog volumnog protoka dobivene preko vage sa iskazanom mjernom nesigurnošću**

Vrijednost protoka:	$Q_p$	$0,1 Q_p$	$Q_i$
Brzina protoka [l/h]:	9 522,1	1 023,5	100,1
Masa [kg]:	141,994	39,757	4,732
Stvarni volumen [dm <sup>3</sup> ]:	142,498 ± 0,068143	39,900 ± 0,06134	4,747 ± 0,068118
Dozvoljena pogreška [± %]:	3,05	3,49	5,00
Trajanje mjerenja [s]:	53	140	170

Tablica 6. Rezultati dobiveni na kalorimetrima

Broj	$Q_p$			$0,1 Q_p$			$Q_i$		
	$V_c$	$V_i$	P	$V_c$	$V_i$	P	$V_c$	$V_i$	P
	[dm <sup>3</sup> ]	[dm <sup>3</sup> ]	[%]	[dm <sup>3</sup> ]	[dm <sup>3</sup> ]	[%]	[dm <sup>3</sup> ]	[dm <sup>3</sup> ]	[%]
Kal. 1	142,498	140,46	-1,43	39,900	39,58	-0,80	4,747	4,91	3,43
Kal. 2	142,498	144,19	1,19	39,900	40,41	1,28	4,747	4,94	4,07

$V_c$  [dm<sup>3</sup>] Volumen dobiven preko mase vode na vagi

$V_i$  [dm<sup>3</sup>] Volumen izmjeren preko kalorimetara

P [%] Pogreška, odstupanje kalorimetara od stvarne vrijednosti

Kao što je vidljivo iz prikazanih rezultata, dozvoljene pogreške kalorimetara se razlikuju ovisno o protoku. Kod minimalnog protoka je najviša dozvoljena pogreška od  $\pm 5\%$ , te se ona smanjuje na  $\pm 3,49\%$  kod  $10\%$  nominalnog protoka, a najmanja je kod nominalnog protoka i iznosi  $\pm 3\%$ . Vidljivo je da su oba kalorimetra zadovoljila mjerenje, odnosno da su unutar dozvoljenih granica pogreške. Iako su oba kalorimetra istog proizvođača, za očekivati je bilo da će svaki pokazati drugačije rezultate. Odstupanje od točnih rezultata dobivenih gravimetrijskom metodom može biti iz više razloga, a najčešći je nakupljanje kamenca na sensorima u kalorimetrima.

Gravimetrijskom metodom dobivamo rezultate sa visokom točnošću, budući da utjecaj na mjernu nesigurnost ima samo temperatura vode koja direktno utječe na gustoću vode, dok se za umjeravanje vage koriste etaloni mase koji su velike točnosti.

## 7. ZAKLJUČAK

Mjerenje protoka, masenog ili volumnog, potrebno nam je u svakodnevnome životu. Ovisno o potrebama, te da li mjerimo maseni ili volumni protok, odabiremo metodu kojom ćemo mjerenja protoka obaviti. U radu smo govorili o nekoliko metoda za mjerenje protoka, koje su više ili manje precizne. Vidjeli smo da postoje metode kod kojih se mjerila ugrađuju sa vanjske strane na cijevi te nemaju nikakav utjecaj na profil strujanja kroz cjevovod, kao što je ultrazvučna metoda mjerenja protoka. Kod nekih metoda se znatno može narušiti strujanje, a to su metode koje mjere protok na temelju prigušivanja. Dali smo detaljan opis gravimetrijske metode mjerenja protoka, te detaljan opis dviju mjernih linija iz Laboratorija za procesna mjerenja (LPM). Mjerne linije koje smo opisali se koriste za umjeravanje manjih mjerila protoka korištenih za svakodnevna mjerenja. Obavili smo mjerenja protoka na mjernoj liniji u LPM-u koristeći dva kalorimetra. Cijela linija je automatizirana te se cijelom linijom upravlja preko računalnog softvera. Linija radi na principu gravimetrijske metode mjerenja protoka, te su svi rezultati dobiveni preko mase vode. Iz rezultata je vidljivo da, iako su oba kalorimetra jednaka, svaki je pokazao drugačije rezultate mjerenja, međutim oba su bila u dozvoljenim granicama odstupanja. Razlozi odstupanja mogu biti brojni, a najčešći je nakupljanje kamenca na sensorima u kalorimetrima, te je zbog toga potrebno povremeno umjeravanje kako se ne bi dobivali krivi rezultati mjerenja protoka. Na kraju smo rekli nešto o mjernoj nesigurnosti, te smo izračunali mjernu nesigurnost za našu liniju. Vidjeli smo da na mjernu nesigurnost kod mjerenja protoka najveći utjecaj ima temperatura vode, budući da temperatura direktno utječe na gustoću vode pa tako i na sam protok.

## LITERATURA

- [1] Nastavni materijali iz kolegija „Toplinska i procesna mjerenja“, FSB, 2012.
- [2] Sirohi, R. S., Radha Krishna, H. C.: *Mechanical Measurements*, Wiley Eastern Limited, New Delhi, India, 1991.
- [3] Mitrović, M., Končar-Đurđević, S.: *Merni instrumenti i elementi regulacije*, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, Srbija, 1986.
- [4] Rock, H., and F. Koschmieder. “A New Method to Detect Zero Drift and Sensitivity of a Coriolis Mass Flow Meter (CMFM) by Using Phasor Control.” In *3rd International Conference on Sensing Technology, 2008. ICST 2008*, 518–22, 2008. doi:10.1109/ICSENST.2008.4757160.
- [5] Comes, M., P. Drumea, M. Blejan, I. Dutu, and A. Vasile. “Ultrasonic Flowmeter.” In *29th International Spring Seminar on Electronics Technology, 2006. ISSE '06*, 386–89, 2006. doi:10.1109/ISSE.2006.365135.
- [6] Eren, H. “Accuracy in Real Time Ultrasonic Applications and Transit-Time Flow Meters.” In *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1998. IMTC/98. Conference Proceedings*, 1:568–72 vol.1, 1998. doi:10.1109/IMTC.1998.679856.
- [7] Li, Gang, Qiao-Zhen Li, and Feng Dong. “Study on Wide-Range Turbine Flowmeter.” In *2006 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 775–78, 2006. doi:10.1109/ICMLC.2006.258452.
- [8] Bengtson, Harlan. “Excel Spreadsheets for Orifice and Venturi Flow Meter Calculations.” *Low Cost Easy to Use Spreadsheets for Engineering Calculations Available at Engineering Excel Spreadsheets*. Accessed January 18, 2015. <http://www.engineeringexcelspreadsheets.com/2011/03/excel-spreadsheets-for-orifice-and-venturi-flow-meter-calculations/>.
- [9] ACTARIS, User's manual, RAC 2200/1/5-AG-EH
- [10] JUSTUR, Tehnical report and operation book, MT 10/15-40, 2005.

## **PRILOZI**

### **I. CD-R disc**