

# Mjerenje protoka plina na platformi Ivana A

## Gas Flow Measurement on the Platform Ivan A

Bruno Orešković

Epik d.o.o.  
E-mail: bruno@epik.hr

DOI 10.17818/NM/2020/3.10

UDK 532.57: 622.242.2

Stručni rad / Professional paper

Rukopis primljen / Paper accepted: 30. 1. 2021.

### Sažetak

Danas se na *offshore* plinskim postrojenjima koristi nekoliko metoda za mjerenje protoka: mjerenje protoka  $dP$  (metodom pada tlaka), mjerenje protoka ultrazvukom, mjerenje protoka masenim protokomjerom, mjerenje protoka na temelju fizikalne pojave vrtloga (*vortex*) i mjerenje protoka termalnim efektom. Cilj ovog članka je obraditi metodu mjerenja protoka metodom pada tlaka ( $dP$ ) koja se koristi trenutno na Inoj platformi Ivana A te prikazati ispitna izvješća s platforme. U članku se razmatraju strojarske komponente koje je potrebno ugraditi, instrumente koji se upotrebljavaju prilikom mjerenja, kao i kroz upravljačke sustave (DCS ili SCADA) na kojima se obrađuju izmjerene vrijednosti te prikazuje jedinični protok plina.

### Summary

Several methods for flow measurement are used on offshore gas installations nowadays: flow measurement by  $dP$  method (pressure drop method), flow measurement by ultrasound, flow measurement by mass flow meter, flow measurement by Vortex and flow measurement by thermal effect. The aim of the paper is to analyse the flow measurement method by using the  $dP$  method, currently being used on the INA platform Ivan A as well as to present the test results obtained on the platform. The paper analyses engineering components to be installed, instruments used during taking measurements as well as management systems (DCS or SCADA) in which the measurements taken are processed and gas flow per unit is shown.

### KLJUČNE RIJEČI

mjerenje protoka plina  
pad tlaka  
*offshore*  
DCS (distributed control system)  
SCADA (supervisory control and data acquisition)

### KEY WORDS

gas flow measurement  
pressure drop  
*offshore*  
DCS (distributed control system)  
SCADA (Supervisory control and data acquisition)

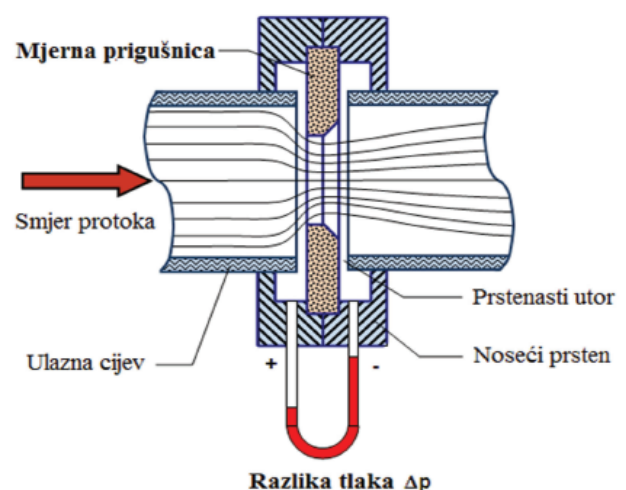
## 1. MJERENJE PROTOKA METODOM $dP$ (PREKO MJERNE PRIGUŠNICE I EFEKTA PADA TLAKA) / Flow measurement by $dP$ method (through orifice plate and gas pressure drop)

U današnjim postrojenjima, kao i na *offshore* građevinama, potreba za mjerenjem protoka je usavršila metode i instrumentaciju. Danas za precizno i točno mjerenje imamo širok spektar opreme koja se nudi na tržištu. U članku se opisuju metode mjerenja protoka koje koriste fizikalnu pojavu pada tlaka na suženom djelu (mjerne prigušnice) cjevovoda koji je proporcionalan brzini strujanja, odnosno volumnom protoku plina. U prvom je dijelu opisana strojarska priprema, u drugom dijelu potrebna instrumentacija za mjerenje, dok je u posljednjem dijelu opisan upravljački sustav te potrebni proračuni kako bi se dobilo što točnije i preciznije mjerenje protoka.

## 2. STROJARSKA PRIPREMA ZA INSTALACIJU / Engineering preparation for installation

Mjerna metoda  $dP$  (*delta pressure*) koristi efekt pada tlaka na cjevovodu. U tu svrhu instalira se mjerna prigušnica ili prigušnica (eng. *orifice plate*), koja se najčešće sastoji od kružne ploče ubačene između pribornica dvije cijevi. Otvor na ploči manjeg je promjera od promjera cijevi, a smisao je suziti površinu protoka fluida. Smanjenjem presjeka, pad tlaka iza prigušnice može doseći polovicu izvornog tlaka. Na prigušnicama je i manji pomoćni otvor za prolaz zaostalog zraka ili plinova, odnosno ukapljene tekućine.

Otvor na mornoj prigušnici specificira se prema proračunu potrebnog pada tlaka te očekivanog protoka. Na slici 1. možemo vidjeti koncept mjerenja protoka uz pomoć mjerne prigušnice.



Slika 1. Koncept mjerenja pomoću mjerne prigušnice  
Figure 1 Measurement by orifice plate

Izvor: Wikipedija. [https://en.wikipedia.org/wiki/Orifice\\_plate](https://en.wikipedia.org/wiki/Orifice_plate)

Prije izrade mjerne prigušnice potrebno je napraviti proračun dimenzije otvora prema procesnim parametrima sustava u kojem će se koristiti.

Izrazi koji će se koristiti za proračun mjerne prigušnice temelje se na Bernullijevom izrazu (1) iz kojeg dobivamo izraz (2):

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2, \quad (1)$$

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho V_2^2 - \frac{1}{2} \rho V_1^2, \quad (2)$$

Da bi dobili potrebni oblik jednadžbe za proračun protoka preko pada tlaka, koristit ćemo i jednadžbu kontinuiteta (3):

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 = q'_v \quad (3)$$

Iz čega slijedi:  $q'_v = \left(\frac{q'_v}{A_1}\right)^1$

Ako iskoristimo taj izraz u prvoj jednadžbi, dobivamo:

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{q'_v}{A_2}\right)^2 - \frac{1}{2} \rho \left(\frac{q'_v}{A_1}\right)^2 \quad (4)$$

$$q'_v = A_2 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)/\rho}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \quad (5)$$

Uvodimo supstituciju za  $\frac{A_2}{A_1}$  u  $\frac{d}{D}$ :

$$q'_v = A_2 \sqrt{\frac{1}{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2}} \sqrt{2(p_1 - p_2)/\rho} \quad (6)$$

Uvodimo koeficijent  $\beta = \frac{d}{D}$  radi lakšeg računanja, kao i koeficijent prigušnice  $C = \frac{C_d}{\sqrt{1 - \beta^4}}$ , gdje je  $C_d$  koeficijent pražnjenja.

Nakon što uvrstimo koeficijent  $C$  u izraz (6), dobivamo jednostavniji oblik izraza preko kojeg možemo računati volumni protok:

$$q_v = C A_2 \sqrt{2(p_1 - p_2)/\rho} \quad \text{m}^3/\text{s} \quad (7)$$

Da bi dobili maseni protok, moramo izraz pomnožiti s koeficijentom gustoće,

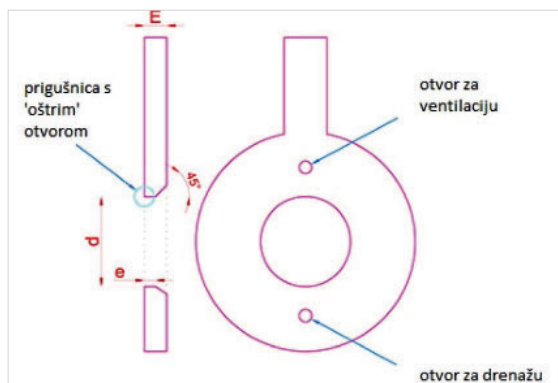
$$q_m = \rho q_v \quad \text{kg/s} \quad (8)$$

Objašnjenje:  $p_1$  – izmjereni tlak ispred mjerne prigušnice (kPa abs),  $p_2$  – izmjereni tlak iza mjerne prigušnice (kPa abs),  $C_d$  – promjer otvora na mjernoj prigušnici (mm),  $q_v$  – koeficijent pražnjenja, volumni protok plina (m<sup>3</sup>/h),  $q_m$  maseni protok plina (kg/h)

Koeficijent pražnjenja  $C_d$  je bezdimenzionalna veličina koju će se posebno izdvojiti kao važan faktor prilikom proračuna volumnog protoka. Koeficijent pražnjenja  $C_d$  se računa preko izraza (9)

$$C_d = \frac{\dot{m}}{\rho q_v} \quad (9)$$

Kao što možemo vidjeti iz izraza (9) koeficijent pražnjenja  $C_d$  ovisi o  $\dot{m}$  - maseni protok medija kroz presjek, o  $q_v$  - volumni protok plina (m<sup>3</sup>/h) te o  $\rho$  - koeficijent gustoće.



Slika 2. prikaz prigušnice s 'oštrim' rubom  
Figure 2 Orifice plate with 'sharp' edge

Izvor: Emerson priručnik: vodič-za-brzi-početak-rada-pločica-za-mjernu-blendu-rosemount-1495-spoj-prirubnice-i-mjerne-prigušnice-rosemount-1496-hr-77654

U aplikaciji koju ćemo ovdje opisati koristi se mjerna prigušnica koja ima tzv. oštri rub (slika 2.). Gledajući presjek prigušnice, ne radi se o pravokutniku, nego o trokutu (engl. *Sharp-edge orifice plate*) te se u tom slučaju koristi druga formula za izračun koeficijenta pražnjenja  $C_d$ , izraz je unormiran prema ISO 5167:

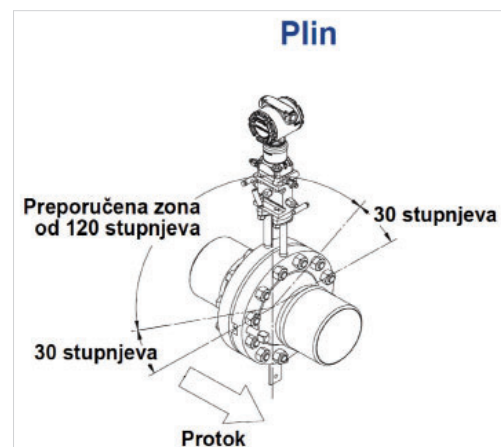
$$C_d = 0.5961 + 0.0261\beta^2 - 0.261\beta^8 + 0.000521 \left(\frac{10^6\beta}{Re_d}\right)^{0.7} + (0.0188 + 0.0063A)\beta^{3.5} \left(\frac{10^6\beta}{Re_d}\right)^{0.7} + (0.043 + 0.080 \exp(-10L_1) - 0.123 \exp(-7L_1)) (1 - (10.11A) \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} - 0.031(M_2^2 - 0.8M_2^{2.1})\beta^{1.3} + 0.011(0.75 - \beta) \left(2.8 - \frac{D}{0.0254}\right)) \quad (10)$$

U našem slučaju za  $L_1 = L_2 = \frac{0.0254}{D}$ , konstanta konstanta  $Re_d$  je Reynoldsov broj koji ovisi o dimenziji cjevovoda, brzini medija i kinematičkoj viskoznosti medija.

Još jedan procesni parametar koji utječe na točnost mjerenja je pad tlaka na samoj prigušnici (DP), gubitak tlaka ili *pressure loss* u cjevovodu kojega možemo izračunati preko izraza (11):

$$\frac{DP}{dP} = 1 - \beta^{1.9} \quad (11)$$

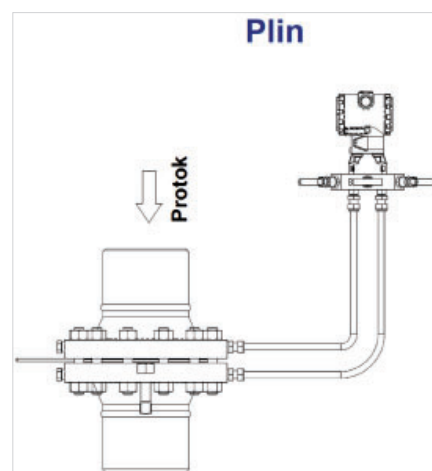
### Strojarska instalacija opreme na platformi Ivana A, primjer



Slika 3. Primjer instalacije instrumenta na cjevovod ovisno o vrsti medija koji mjeri. U ovom slučaju se radi o mjerenju protoka plina.

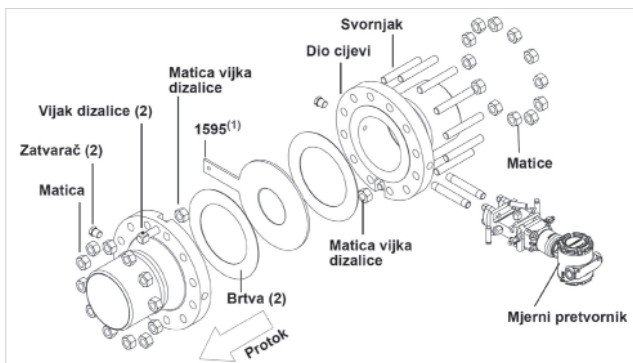
Figure 3 An example of instrument installation onto pipeline depending on the medium being measured. In this case gas flow measurement is taken.

Izvor: Emerson manual: Emerson priručnik: vodič-za-brzi-početak-rada-pločica-za-mjernu-blendu-rosemount-1495-spoj-prirubnice-i-mjerne-prigušnice-rosemount-1496-hr-77654



Slika 4. Položaj instrumenta u odnosu na cjevovod  
Figure 4 Positioning of instrument in relation to pipeline

Izvor: Emerson manual: Emerson priručnik: vodič-za-brzi-početak-rada-pločica-za-mjernu-blendu-rosemount-1495-spoj-prirubnice-i-mjerne-prigušnice-rosemount-1496-hr-77654



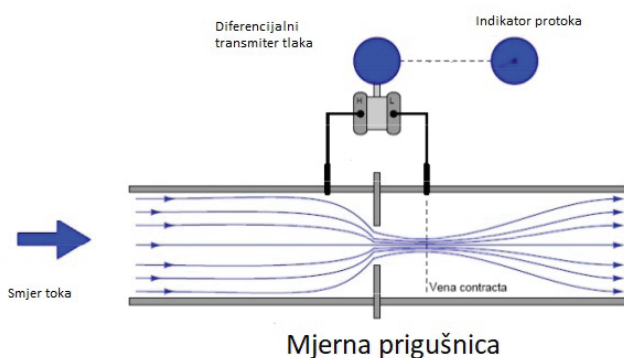
Slika 5. Potrebne komponente djela strojarske pripreme za instalaciju

Figure 5 Components required for engineering preparation for installation

Izvor: Emerson manual: Emerson priručnik: vodič-za-brzi-početak-rada-pločica-za-mjernu-blendu-rosemount-1495-spoj-prirubnice-i-mjerne-prigušnice-rosemount-1496-hr-77654

### 3. MJERNI UREĐAJ, INSTRUMENTACIJA / Measurement device, instrumentation

Nakon izbora mjerne prigušnice, odnosno proračuna dimenzije, odabire se diferencijalni transmiter tlaka kao mjerni instrument. Njegove specifikacije ovise o procesnim parametrima sustava, o očekivanom tlaku, protoku i temperaturi. Uređaj se sastoji od dvije mjerne ćelije. Transmitter prikazuje razliku između dva mjerenja u obliku strujnog signala na svojem izlazu prema centralnom upravljačkom sustavu



Slika 6. Instalacija diferencijalnog transmittera tlaka  
Figure 6 Installation of differential pressure transmitter

Mjerni opseg, koji će se definirati prilikom projektiranja, najvažnija je specifikacija mjernog instrumenta. Mjerni opseg instrumenta u izravnoj je vezi s očekivanim protokom kroz plinovod, što se izrazu 2. izvedenog iz Bernoullijeve jednadžbe kontinuiteta:

$$Q = C \cdot A_2 \cdot \sqrt{2(P_1 - P_2) / \rho}, m^3/h$$

Izraz 2. Relacija između pada tlaka i protoka

Objašnjenje:  $A_2$  je površina otvora mjerne prigušnice,  $P_1$  je tlak prije mjerne prigušnice,  $P_2$  je tlak iza mjerne prigušnice,  $\rho$  je gustoća fluida.  $C$  je konstanta koja ovisi o koeficijentu propusnosti mjerne prigušnice  $C_d$  kao i o omjeru promjera plinovoda i promjera mjerne prigušnice.

Mjerni opseg instrumenta izražen je u SI jedinicama; ( bar, ili češće u mbar). Tipični mjerni opseg instrumenta je 0 - 100 mbar

ili 0 - 200 mbar. Izmjerena vrijednost instrumenta se šalje prema centralnom upravljačkom sustavu analognim ili digitalnim izlazom. Najčešća izvedba je analogni izlaz radi robusnosti i pouzdanosti mjerenja gdje koristimo iznos struje u mA koja odgovara mjernom opsegu instrumenta. U opisanom slučaju strujni mjerni opseg od 4 do 20 mA odgovarao bi mjernom rasponu 0 – 100 mbar.



Slika 7. Diferencijalni transmiter tlaka instaliran na platformi Ivana A

Figure 7 Differential pressure transmitter installed on the platform Ivan A

### 4. PRIKAZ IZMJERENE VELIČINE PROTOKA NA CENTRALNOM UPRAVLJAČKOM SUSTAVU / Measured flow rate on the central control system

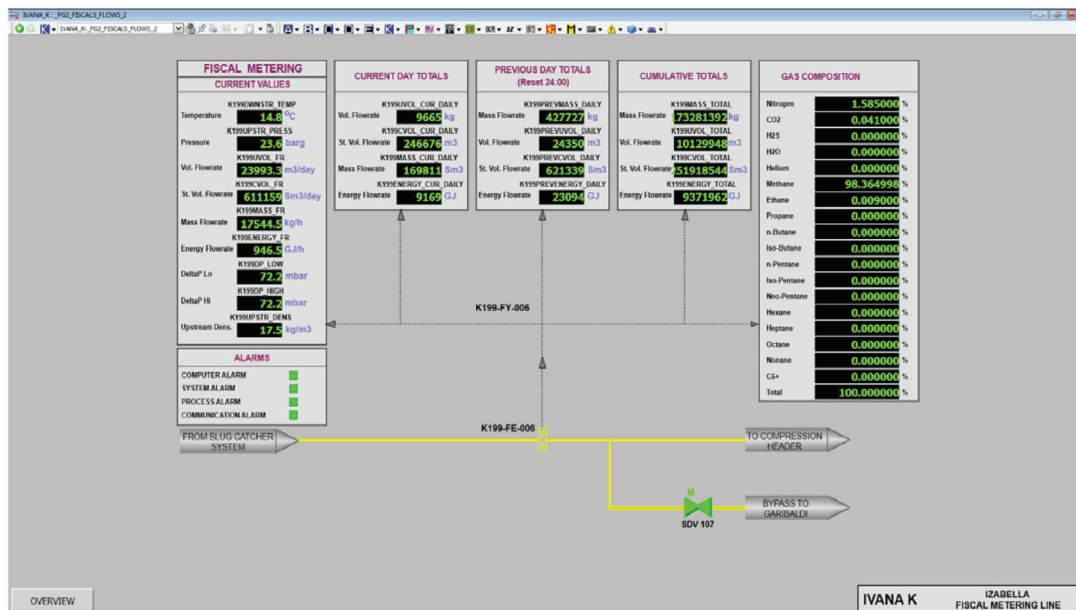
Sve izmjerene veličine transmiterima se šalju na centralni upravljački sustav na kojem se obavlja konverzija, proračun, prikaz, kao i pohrana mjerenja. Centralni upravljački sustav može biti SCADA ili DCS. Upravljački sustav prima strujni signal te vrši pretvorbu u fizikalnu veličinu koja će biti prikazana operateru.

U slučaju potrebe preciznijeg i točnijeg mjerenja protoka na plinovodu, uz instrument diferencijalnog tlaka, ugrađeni su i dodatni uređaji poput instrumenta za mjerenje tlaka, kao i instrumenta za mjerenje temperature medija (zakon idealnog plina).

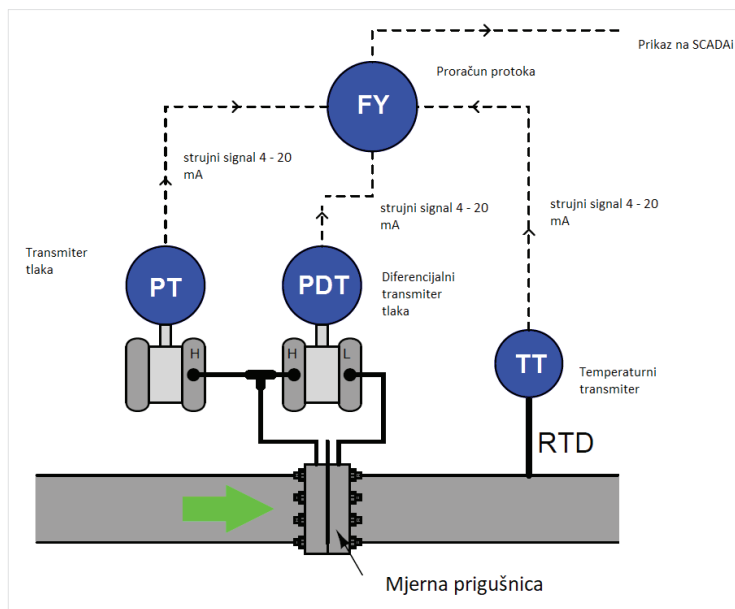
Mjerna očitavanja sva tri instrumenta šalju se transmitemerom tlaka ili temperature, strujnim signalom prema upravljačkome sustavu koji radi korekcije prikaza protoka s obzirom na izmjereni tlak i temperaturu medija. Na slici 7. prikazano je mjerenje protoka na tipičnoj SCADAi koju možemo susresti i na offshore instalacijama.

Kako bi imali prikaz na upravljačkome sustavu, protok u N/h ili kompenzaciju, mjerenje protoka po tlaku i temperaturi u /h, u upravljački program se unosi izraz koji omogućuje izračun.

Na slici 9. prikazan je koncept mjerenja protoka i kompenzacije po tlaku i temperaturi.



Slika 8. Prikaz mjerenja protoka na SCADA i (Ivana K)  
Figure 8 Flow measurement on SCADA i (Ivan K)



Slika 9. Koncept mjerenja protoka uz mjerenje tlaka i temperature u svrhu kompenzacije  
Figure 9 Flow measurement concept with pressure and temperature measurements for the purpose of compensation

$$\rho = \frac{M_{gas}P}{ZRT}, \text{ kg/m}^3$$

Izraz 3. Ovisnost gustoće plina o temperaturi i tlaku

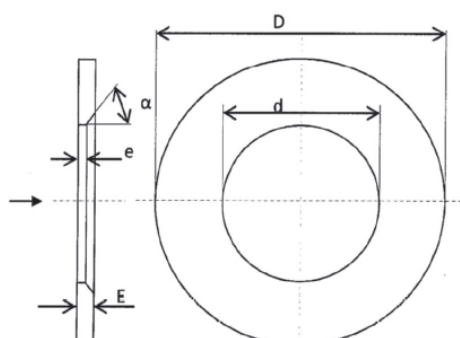
Temeljem zakona o idealnom plinu, vidi ovisnost gustoće plina o procesnim veličinama koja direktno utječe na izmjereni protok plina.

P – izmjereni tlak plina, T – izmjerena temperatura plina,  $M_{gas}$  – molarni broj plina, R – univerzalna konstanta plina, Z – faktor kompresije

## 5. ISPITNA IZVJEŠĆA S PLATFORME IVANA A / Test results from the platform Ivan A

U ovim ispitnim izvješćima možemo vidjeti koji su bitni elementi mjerenja protoka metodom dP i kako se ti elementi ispituju i umjeravaju.

Trenutna situacija na platformi Ivana A po pitanju protoka je da se isporučuje oko 550 000 m<sup>3</sup> plina na dan, što znači da imamo protok u iznosu od 381 m<sup>3</sup>/s.



Slika 1. Prikaz dimenzionalnih značajki oštrobridne prigušnice

Tablica 1. Rezultati mjerenja  
Table 1. Measurement results

Mjerena značajka Characteristic		Izmjerena vrijednost Measured value				Mjerna nesigurnost Measurement uncertainty
Srednje aritmetičko odstupanje profila Ra, $\mu\text{m}$ Arithmetic mean deviation of the profile Ra	Ulaz Inlet	0,460				15%
	Izlaz Outlet	0,324				
Ravnost, mm Flatness	Ulaz Inlet	0,153				0,004
Debljina prigušnice, mm Thickness	E	6,426	6,420	6,409	6,418	0,005
	$E_{sr}$	6,418				
	Raspon E	0,017				
Debljina otvora, mm Thickness	e	4,651	4,656	4,643	4,634	0,010
	$e_{sr}$	4,646				
	Raspon e	0,022				
Izlazni kut prigušnice Angle bevel	$\alpha_{sr}$	45,29°				0,08°
Promjer otvora prigušnice, mm Inner diameter	d	141,233	141,230	141,235	141,233	0,004
	$d_{sr}$	141,233				
	Raspon d	0,005				
Odstupanje od kružnosti otvora, mm Roundness deviation at d	RONt	0,013				0,004
Vanjski promjer, mm Outside diameter	D	319,821				0,004

Mjerio:  
Measured by  
*Marko Katić*  
Dr.sc. Marko Katić  
Tomislav Habek

Provjerio:  
Check by  
*gorana*  
Dr.sc. Gorana Baršić

LFSB-MR 050-1

Slika 10. Primjer ispitnih izvješća za prigušnicu koja je instalirana na platformi Ivana A  
Figure 10 A sample of test reports for orifice plate installed on the platform Ivan A

Izvor: arhiva platforme Ivana A

## 6. ZAKLJUČAK / Conclusion

Točnost mjerenja metodom dP ovisi o preciznosti izrade i proračuna mjerne prigušnice, točnosti i preciznosti odabranog mjernog instrumenta, a kao i o izrazima koji se koriste prilikom proračuna protoka. Uz pretpostavku da se ne mijenja koeficijent pražnjenja  $C_d$  točnost mjerenja koja se može postići ovom metodom može biti ispod 1,0 % trenutnog protoka kao u našem slučaju. Utjecaj greške sP transmittera tlaka na ukupnu grešku je ispod 0,1 %. Greška mjerenja ovisi i o temperaturi medija, kao i o ukupnome tlaku medija. Uz dobru kompenzaciju, greška uzrokovana tim procesnim parametrima može se svesti na nulu.

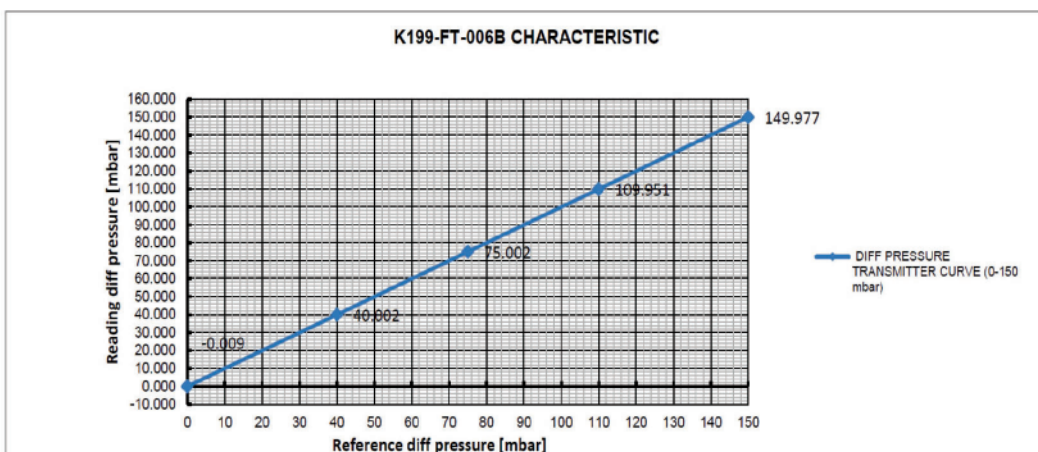
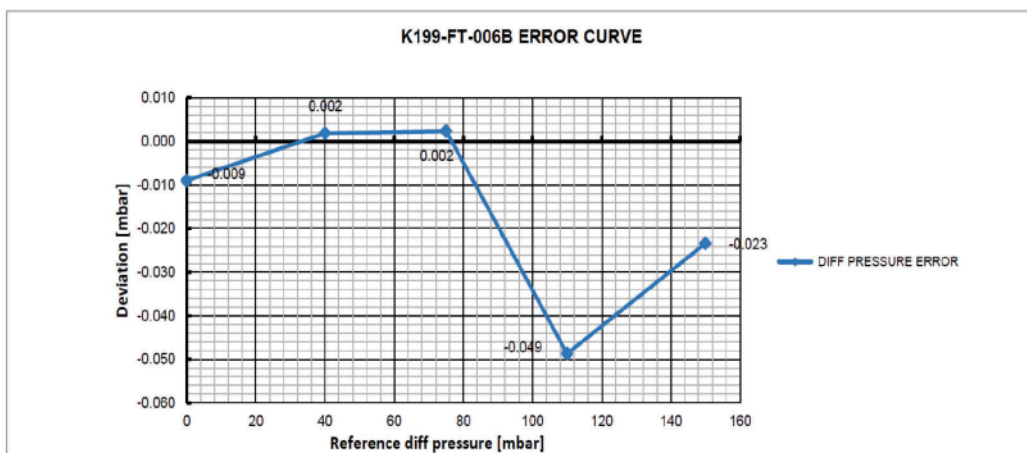
Mjerenje protoka mjernom metodom pada tlaka je danas uobičajeno na offshore instalacijama zbog jednostavnog mjerenja, lakog održavanja te nezahtjevne instalirane opreme.

Ova se metoda može primijeniti u nekoliko procesnih aplikacija. Primjerice, mjerenje protoka u svrhu indikacije protoka, regulacije protoka (manje se koristi) ili u svrhu količinskog obračuna isporučene plina kupcu.

Spomenuto mjerenje danas se koristi na platformi Ivana A. Na istoj se platformi mjeri temperatura i tlak plina. T se vrijednosti uzimaju kao kompenzacijski faktor pri izračunu količine plina isporučene kupcu.

CALIBRATION DATA K199-FT-006B

Reference [mbar]	Reading [mbar]	Deviation [mbar]
0	-0.009	-0.009
40	40.002	0.002
75	75.002	0.002
110	109.951	-0.049
150	149.977	-0.023



74.000 mbar Reading operating point

73.998 mbar Calculated corrected reading in operating point 74 mbar (from characteristic)

Difference

0.002 mbar 0.003 %

**Reading 74 mbar is more than it should be**

Error in gas flow

0.001 %

**Differential transmitter error produce around 0.001 % higher reading of flow rate.**

Slika 11. Ispitno izvješće diferencijalnog transmitera tlaka i proračun greške mjerenja  
Figure 11 Test report on differential pressure transmitter and calculation of measurement error

Izvor: arhiva platforme Ivana A

```

=====
STATION 1 CONFIGURATION REPORT                                04/07/2017 11:21:28
=====

      No report configured

=====
STREAM 1 CONFIGURATION REPORT
=====

ORIFICE PLATE MATERIAL          STAINLESS
METER TUBE MATERIAL            CARBON ST
ORIFICE REF DIAMETER           141.233000 mm
METER TUBE REF DIAMETER        288.925000 mm
ORIFICE TAP CONFIG             FLANGE
METER IDENTIFIER               LINE 01
CONTRACT HOUR                  06:00
STATIC PRESS LOSCALE           23.621126 barg
STATIC PRESS HISCALE           23.621126 barg
TEMPERATURE LOSCALE            14.817861 Deg.C
TEMPERATURE HISCALE            14.817861 Deg.C
PRESSURE BASE (Pb)             0.000000 barg
TEMPERATURE BASE (Tb)          15.000000 Deg.C
AGA 8 CALCULATION METHOD        DETAIL
STATIC PRESSURE TAP LOCN       ON-LINE
LOW DIFFERENTIAL CUT OFF       1000.000000 kg/h
REAL RD (SG)                   0.561648
UPSTR COMP(Zf)                 0.953267
GAS COMPONENTS                 1.577000 NITROGEN
                                0.031000 CO2
                                0.000000 H2S
                                0.000000 H2O
                                0.000000 HELIUM
                                98.383000 METHANE
                                0.009000 ETHANE
                                0.000000 PROPANE
                                0.000000 N_BUTANE
                                0.000000 I_BUTANE
                                0.000000 N_PENTANE
                                0.000000 I_PENTANE
                                0.000000 NEO_PENTANE
                                0.000000 HEXANE
                                0.000000 HEPTANE
                                0.000000 OCTANE
                                0.000000 NONANE
                                0.000000 DECANE
                                0.000000 OXYGEN
                                0.000000 CO
                                0.000000 HYDROGEN
                                0.000000 BENZENE
                                0.000000 TOLUENE
                                0.000000 ARGON
                                0.000000 C6_PLUS
                                0.000000 CX_PLUS
                                100.000000 TOTAL
=====

```

Slika 12. Popis parametara koji utječu na proračun protoka, platforma Ivana A  
*Figure 12 List of parameters affecting calculation of flow, Ivan A platform*

Izvor: arhiva platforme Ivana A

## LITERATURA / References

- [1] Emerson priručnik: vodič-za-brzi-početak-rada-pločica-za-mjernu-blendu-rosemount-1495-spoj-prirubnice-i-mjerne-prigušnice-rosemount-1496-hr-77654
- [2] FER-procesna mjerenja: [https://www.fer.unizg.hr/\\_download/repository/Emerson\\_prezentacija\\_17.1.2014.pdf](https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/Emerson_prezentacija_17.1.2014.pdf)
- [3] Bernoullijeva jednadžba, URL: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=7186>, "Hrvatska enciklopedija", Leksikografski zavod Miroslav Krleža, www.enciklopedija.hr
- [4] Rasplinjač, URL: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=51870>, "Hrvatska enciklopedija", Leksikografski zavod Miroslav Krleža, www.enciklopedija.hr, 2016.
- [5] Seminar AVP-4, Procesna mjerenja, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, Laboratorij za automatiku i mjerenja, 2017.
- [6] The Engineering's Guide to DP Flow Measurement, 2020 Edition, Emerson Automation Solutions