

Referenčne merilne zmogljivosti meroslovnega laboratorija za pretok različnih plinov

Jože KUTIN, Gregor BOBOVNIK, Ivan BAJSIĆ

Izvleček: V prispevku so predstavljena izhodišča za postavitev referenčnih merilnih zmogljivosti v meroslovnem laboratoriju na področju merjenja pretoka različnih plinov. Podane so osnovne definicije pretoka plina ter izhodišča merilnih modelov za določanje pretoka plina in vrednotenje merilne negotovosti. Kot primer so predstavljeni referenčni etalonski merilni sistemi ter kalibracijske in merilne zmogljivosti (CMC) akreditiranega meroslovnega laboratorija, v katerem delujejo avtorji tega prispevka.

Ključne besede: meroslovje pretoka plina, merilni model, referenčni etalon, CMC

■ 1 Uvod

Potrebe po merjenju pretoka različnih plinov ter primerni merilni zmogljivosti in sledljivosti pripadajoče merilne opreme se kažejo na številnih področjih znanosti in tehnologije, kot so npr. ekologija in varstvo okolja, medicina in farmacija, avtomobilska industrija, področje ogrevanja, prezračevanja in klimatizacije, čiste tehnologije, plinska kromatografija, distribucija plina ipd. Redno preverjanje merilnih zmogljivosti in zagotavljanje merilne sledljivosti merilne opreme poteka v ustrezno usposobljenih meroslovnih laboratorijih, kot so akreditirani kalibracijski laboratoriji, nacionalni meroslovni inštituti oz. nosilci nacionalnih etalonov, akreditirani kontrolni organi (velja za zakonska merila, kot so plinomeri in korektorji prostornine plina).

Namen prispevka je predstaviti iz-

hodišča za postavitev referenčnih merilnih zmogljivosti v meroslovnem laboratoriju za področje pretoka plina. Kot primer so predstavljeni referenčni etalonski merilni sistemi ter kalibracijske in merilne zmogljivosti za pretok različnih plinov v Laboratoriju za meritve v procesnem strojništvu (LMPS) na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani, ki je na tem področju od leta 2012 akreditiran kot kalibracijski laboratorij po standardu ISO/IEC 17025 [1]. Referenčne merilne zmogljivosti za pretok plina razvijamo in potrjujemo v okviru temeljnih raziskav etalonskih merilnih sistemov [2–4] in medlaboratorijskih primerjav s tujimi nacionalnimi meroslovnimi laboratoriji [5–7]. Te merilne zmogljivosti uporabljamo za zagotavljanje merilne sledljivosti na nižjo meroslovno raven ter pri razvojnoroziškovnem delu na različnih temeljnih in industrijskih projektih [8–11].

V poglavju 2 so podane osnovne definicije pretoka, ki se uporabljajo na področju meroslovja pretoka plina. V poglavju 3 so definirana izhodišča merilnih modelov za določanje pretoka plina in glavne skupine potencialno vplivnih parametrov

na merilno negotovost. V poglavju 4 sta podana kratek pregled pomembnejših referenčnih etalonov na področju pretoka plina ter podrobnejša predstavitev merilnih sistemov s premičnim batom in kritičnimi merilnimi šobami. V poglavju 5 je opredeljen pojem kalibracijske in merilne zmogljivosti (CMC), temeljne kvantitativne informacije o meroslovni kakovosti laboratorija.

■ 2 Definicija pretoka plina

Na področju meroslovja pretoka plina se uporabljajo različne definicije pretoka, kot so prostorninski tok, masni tok ter standardni oz. normni prostorninski tok [12, 13].

Prostorninski tok q_v predstavlja količino pretečene prostornine plina čez določeno pretočno površino na enoto časa, z osnovno enoto m^3/s , in je v splošnem definiran kot:

$$q_v = \frac{\partial V}{\partial t} = \int_A \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dA \quad (1)$$

kjer je $\mathbf{v}$ vektor hitrost plina in $\mathbf{n}$ normala na opazovano pretočno površino A . Za tok plina čez določen prečni preseka cevi lahko zapišemo:

Doc. dr. Jože Kutin, univ. dipl. inž., doc. dr. Gregor Bobovnik, univ. dipl. inž., izr. prof. dr. Ivan Bajsić, univ. dipl. inž., vsi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

$$q_v = \bar{v}A \quad (2)$$

kjer je $\bar{v}$ povprečna hitrost plina v prečnem preseku v smeri toka.

Masni tok q_m predstavlja količino pretečene mase plina čez določeno površino na enoto časa, z osnovno enoto kg/s, in je v splošnem definirano kot:

$$q_m = \frac{\partial m}{\partial t} = \int_A \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dA \quad (3)$$

kjer je ρ gostota plina. Za tok plina čez določen prečni presek cevi, v katerem predpostavimo konstantno gostoto, lahko zapišemo:

$$q_m = \rho \bar{v}A \quad (4)$$

oz. izraženo s prostorninskim tokom kot:

$$q_m = \rho q_v \quad (5)$$

Gostota snovi je v splošnem definirana kot razmerje med maso snovi na enoto prostornine. Pri plinih se večinoma s plinsko enačbo stanja:

$$\rho = \frac{p}{Z(R/M)T} \quad (6)$$

kjer je p absolutni tlak, T absolutna temperatura, $R = 8,314472$ J/mol/K splošna plinska konstanta, M molska masa plina in Z faktor stisljivosti.

Pri plinih se masni tok pogosto podaja tudi kot standardni prostorninski tok q_s , z osnovno enoto sm^3/s (popolnoma ekvivalentno se uporablja tudi oznaka normni prostorninski tok, z osnovno enoto nm^3/s), za katerega velja naslednja povezava z masnim tokom:

$$q_m = \rho_s q_s \quad (7)$$

Pri takem podajanju mora biti jasno definirana vrednost standardne gostote ρ_s ali pa pripadajoči standardni tlačni in temperaturni pogoji. Pozorni moramo biti na dejstvo, da se v praksi na različnih področjih uporabljajo različni standardi oz. normni pogoji (za tlak najpogostejše 101,325 kPa, za temperaturo pa 0 °C, 15 °C, 20 °C, 21,1 °C itd.).

3 Referenčna vrednost pretoka plina

Za določanje referenčne vrednosti pretoka plina v prvi vrsti potrebujemo primeren etalonski merilnik oz. merilni sistem s primerno merilno zmogljivostjo in merilno sledljivostjo. V splošnem se mesto, na katero je v pretočnem sistemu nameščen etalon, in mesto, za katero želimo določiti referenčno vrednost pretoka, razlikujeta. Primer take izvedbe je shematsko prikazan na *sliki 1*. Parametre, vezane na etalonski merilnik, označimo z indeksom »e«, na opazovano merilno mesto z indeksom »r«, na vmesno povezovalno prostornino z indeksom »d« in na vmesno puščanje z indeksom »l«.

Ob upoštevanju zakona ohranitve mase lahko vrednost masnega toka plina na opazovanem merilnem mestu v splošnem definiramo kot:

$$q_{m,r} = q_{m,e} - q_{m,d} - q_{m,l} \quad (8)$$

kjer je $q_{m,e}$ masni tok na mestu etalona, $q_{m,d}$ akumulacijski masni tok v povezovalni prostornini in $q_{m,l}$ masni tok puščanja. Prostorninski tok plina na opazovanem merilnem mestu pa določimo kot:

$$q_{v,r} = \frac{q_{m,r}}{\rho_r} \quad (9)$$

Akumulacijski masni tok $q_{m,d}$ predstavlja vpliv spreminjanja gostote plina v povezovalni prostornini ρ_d (npr. zaradi spreminjanja tlaka oz. temperature plina) in vpliv spreminjanja velikosti povezovalne prostornine V_d (npr. zaradi raztezkov cevovoda):

$$q_{m,d} = \frac{\partial m_d}{\partial t} = \frac{\partial \rho_d}{\partial t} V_d + \rho_d \frac{\partial V_d}{\partial t} \quad (10)$$

Postavljeno bilanco masnih tokov (8) lahko poenostavimo, če zagotovimo merjenje v stacionarnih tokovnih razmerah brez puščanja ($q_{m,d} = 0$ in $q_{m,l} = 0$).

Pri oceni merilne negotovosti referenčne vrednosti pretoka plina moramo v splošnem upoštevati naslednje prispevke:

- merilna negotovost z etalom izmerjenega pretoka plina,
- merilna negotovost določanja gostote ali razmerja gostot plina,
- merilna negotovost zaradi sprememb mase plina v povezovalni prostornini,
- merilna negotovost zaradi puščanja plina med etalom in opazovanim merilnim mestom.

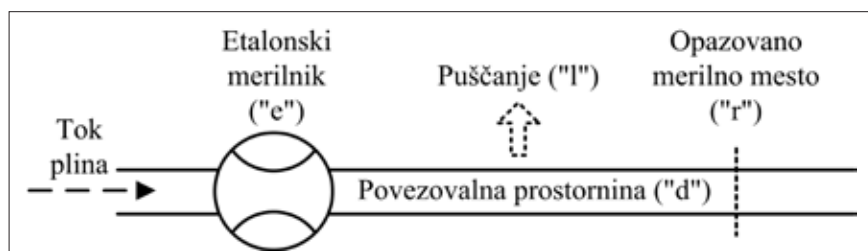
Merilna negotovost gostote plina v splošnem vključuje naslednje prispevke:

- merilna negotovost merjenja tlaka,
- merilna negotovost merjenja temperature,
- merilna negotovost sestave plina (vpliv na molsko maso in faktor stisljivosti),
- merilna negotovost modela za izračun gostote plina (npr. model za faktor stisljivosti).

Vrednotenje in podajanje merilne negotovosti mora potekati v skladu z mednarodno uveljavljenimi standardnimi metodami [14, 15].

4 Referenčni etalon za pretok plina

Na višji meroslovni ravni kot referenčne etalone izbiramo merilne metode, pri katerih je mogoče povezavo med merjeno veličino in

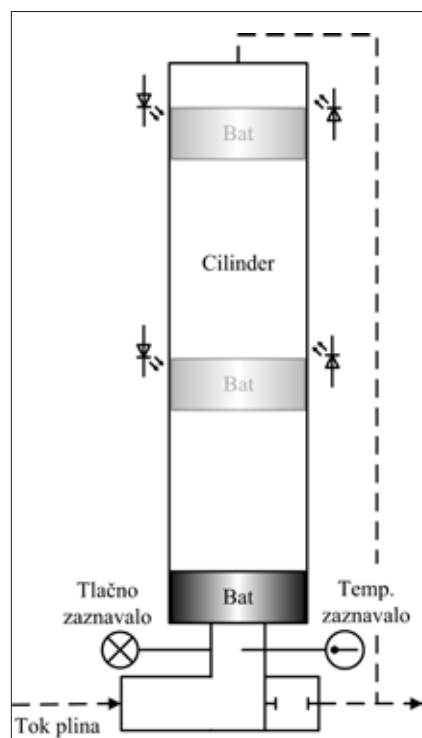


Slika 1. Shematski prikaz pretočnega merilnega sistema

merilnim učinkom (merilni model) izraziti z osnovnimi fizikalnimi principi in tako z osnovnimi merskimi enotami SI. Primeri tovrstnih referenčnih etalonov na področju pretoka plina so (v oklepaju je podan glavni merilni učinek): gravimetrični merilni sistemi (sprememba mase v časovnem intervalu), volumetrični merilni sistemi (sprememba prostornine v časovnem intervalu), merilni sistemi PVTt (sprememba tlaka v časovnem intervalu), kritične merilne šobe (kritične tokovne razmere v konvergentno-divergentni šobi), laminarni merilniki (padec tlaka v laminarnih tokovnih razmerah) itd. [12,13]. V nadaljevanju sta bolj podrobno predstavljeni dve različici referenčnih etalonov, ki jih uporabljamo v laboratoriju LMPS: volumetrični etalon s premičnim batom (poglavje 4.1) in kritične merilne šobe (poglavje 4.2).

■ 4.1 Referenčni etalon za pretok plina s premičnim batom

Merilniki pretoka plina s premičnim batom delujejo na osnovi določanja časovnega intervala, ki ga potrebuje premični bat, da v cilindru pre-



Slika 2. Shematski prikaz etalonskega merilnika pretoka plina s premičnim batom

potuje znano prostornino plina pri definiranem tlaku in temperaturi. Dejanska izvedba merilnika s premičnim batom [16, 17] je shematsko prikazana na *sliki 2*. Bat je izdelan iz grafitnega kompozita in cilindar iz borosilikatnega stekla. Na zunanji steni cilindra so nameščena optična zaznavala za prehod bata, katerih merilne signale uporablja časovna baza za določanje časovnega intervala. V merilniku so tudi temperaturna in tlačna zaznavala, katerih izmerki se uporabijo za določanje nominalne gostote in korekcije gostote plina. S tremi merilnimi celicami različnih dimenzij lahko merimo pretoke različnih plinov v območju od 1 cm³/min do 50 dm³/min oz. 1,2 mg/min do 60 g/min (ekvivalentne vrednosti pretoka za zrak oz. dušik pri cca 100 kPa in 20 °C).

Masni tok plina se določa po naslednjem merilnem modelu:

$$q_m = \rho(p_a, T) q_v(p_a, T), \quad (11)$$

$$q_v(p_a, T) = \left(\frac{V_m^*}{\Delta t} + q_{v,l}^{(p)} \right) \varepsilon_p$$

kjer je $\rho(p_a, T)$ nominalna gostota plina pri okoliskem tlaku p_a in temperaturi plina T ter $q_v(p_a, T)$ pripadajoč prostorninski tok plina, V_m^* efektivna merilna prostornina cilindra, $\Delta t = t_2 - t_1$ časovni interval prehoda bata čez merilno prostornino, $q_{v,l}^{(p)}$ Poisseuilleova komponenta pretoka puščanja skozi režo med batom in cilindrom in ε_p korekcijski faktor gostote plina. Efektivna merilna prostornina cilindra je določena kot:

$$V_m^* = L_m \frac{\pi(D + \delta)^2}{4} \quad (12)$$

kjer je L_m razdalja med optičnimi zaznavali, D zunanji premer bata, δ velikost reže med batom in cilindrom ter $D + \delta$ efektivni premer cilindra, ki upošteva vpliv Couettove komponente pretoka puščanja (zmanjšan z $D + 2\delta$ na $D + \delta$). Originalno se v dani izvedbi merilnika uporablja t. i. izotermni model za korekcijski faktor gostote plina [16, 17]:

$$\varepsilon_p = 1 + \frac{p_2}{p_a} + \frac{p_2 - p_1}{p_a} \frac{V_d}{V_m^*} \quad (13)$$

kjer je p_1 nadtlak plina pri času t_1 , p_2 nadtlak plina pri času t_2 in V_d povezovalna prostornina plina med opazovanim merilnim mestom in lego bata pri času t_1 . Izotermni model za ε_p izkazuje določene pomanjkljivosti v primeru visokofrekvenčnih tlačnih nihanj, ki se pojavljajo v merilniku. Tako so avtorji tega prispevka razvili, implementirali in validirali t. i. adiabatni model za korekcijski faktor gostote plina [2,3]:

$$\varepsilon_p = 1 + \frac{\bar{p}_{12}}{p_a} + \frac{1}{\gamma} \left(\frac{p_2 - \bar{p}_{12}}{p_a} + \frac{p_2 - p_1}{p_a} \frac{V_d}{V_m^*} \right) \quad (14)$$

kjer je $\bar{p}_{12}$ povprečna vrednost nadtlaka v časovnem intervalu Δt in γ razmerje specifičnih toplot oz. adiabatni indeks.

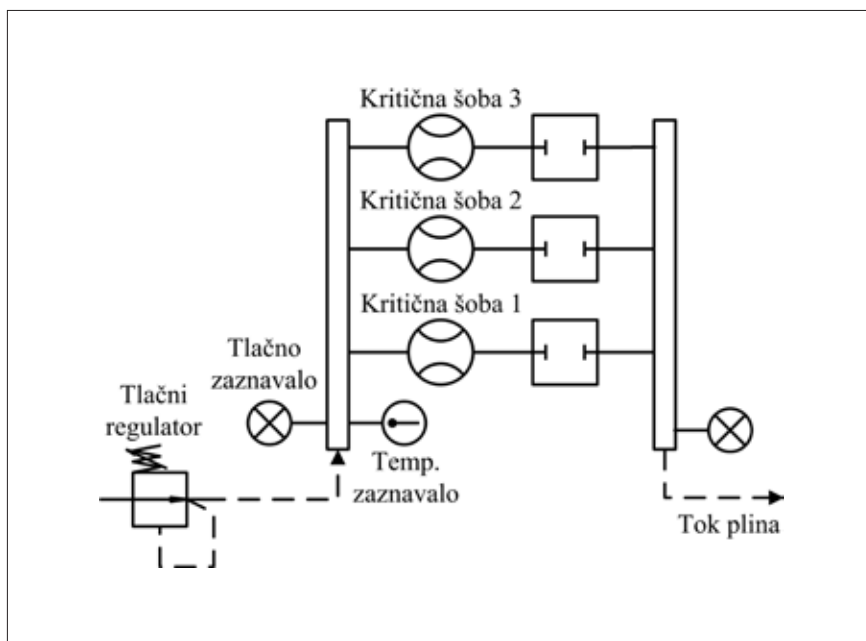
■ 4.2 Referenčni etalon za pretok plina s kritičnimi merilnimi šobami

Kritične merilne šobe delujejo na osnovi zagotovitve kritičnih tokovnih razmer toka plina skozi konvergentno-divergentno šobo (to pomeni dosežena zvočna hitrost plina v najožjem prerezu), v katerih je masni tok plina skozi šobo odvisen le od vstopnih tlačnih in temperaturnih pogojev. Kritične tokovne razmere so dosežene pri razmerju izstopnega in vstopnega absolutnega tlaka, ki je manjše od kritičnega. Uporabljene kritične merilne šobe imajo standardno toroidalno obliko Venturijeve cevi [18,19] in dosegajo kritično tlačno razmerje, večje od 0,75. S tremi kritičnimi šobami različnih dimenzij lahko merimo pretoke različnih plinov v območju od 60 do 1060 g/min oz. 50 do 900 dm³/min (ekvivalentne vrednosti pretoka za zrak oz. dušik pri cca 100 kPa in 20 °C). Izvedba merilnega sistema s kritičnimi šobami je shematsko prikazana na *sliki 3*.

Masni tok plina se določa po naslednjem merilnem modelu [18]:

$$q_m = C_d q_{m,id} \quad (15)$$

kjer je $q_{m,id}$ idealni masni tok skozi



Slika 3. Shematski prikaz merilnega sistema za pretok plina s kritičnimi šobami

merilno šobo v kritičnih tokovnih razmerah, ki velja ob predpostavki izentropnega in enorazsežnega toka idealnega plina, in C_d pretočni koeficient, ki upošteva vplive realnih tokovnih razmer. Idealni masni tok je definiran kot:

$$q_{m,id} = \frac{A_d C_{*0} p_0}{\sqrt{(R/M) T_0}} \quad (16)$$

kjer je p_0 absolutni stagnacijski tlak na vstopu kritične šobe, T_0 absolutna stagnacijska temperatura na vstopu kritične šobe, $A_d = \pi d^2 / 4$ prečni presek najožjega dela kritične šobe s premerom d in C_{*0} kritična tokovna funkcija pri p_0 in T_0 . Stagnacijski tlak in temperatura, p_0 in T_0 , sta z merjenim tlakom in temperaturo na vstopu kritične šobe, p_1 in T_1 , povezana kot:

$$p_0 = p_1 \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} Ma_1^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}, \quad (17)$$

$$T_0 = T_1 \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} Ma_1^2 \right]$$

kjer je Ma_1 Machovo število na vstopu kritične šobe s premerom D . Pretočni koeficient je izražen kot funkcija Reynoldsovega števila Re_d :

$$C_d = a + b / Re_d^n, \quad (18)$$

$$Re_d = \frac{4q_m}{\pi d \eta_0}$$

kjer je η_0 dinamična viskoznost plina pri p_0 in T_0 , koeficienti a , b in n pa so odvisni od izvedbe kritične šobe.

5 Kalibracijska in merilna zmogljivost (CMC)

Kalibracijska in merilna zmogljivost (CMC – Calibration and Measurement Capability) je izražena kot razširjena merilna negotovost merjene veličine za interval zaupanja približno 95 % (faktor pokritja $k = 2$). To je najmanjša merilna negotovost, ki jo lahko laboratorij ponudi v običajnih pogojih. Kalibracijski oz. umerjevalni laboratoriji svoje CMC-vrednosti potrjujejo v postopku ugotavljanja skladnosti z zahtevami standarda ISO/IEC 17025, ki ga izvede mednarodno priznan akreditacijski organ, pri nas Slovenska akreditacija (SA). Potrjene CMC-vrednosti laborato-

rija so podane v Prilogi k akreditacijski listini, ki je dostopna na spletni strani akreditacijskega organa. Nacionalni meroslovni laboratorij oz. nosilci nacionalnih etalonov svoje CMC-vrednosti potrjujejo s ključnimi primerjavami v okviru BIPM (*Bureau International des Poids et Mesures*) in so podane v podatkovni bazi BIPM.

Preglednica 1 prikazuje primer sedaj veljavnih CMC-vrednosti akreditiranega laboratorija LMPS na področju pretoka plina za umerjanje merilnikov/krmilnikov masnega in prostorninskega toka, pri čemer lahko umerjanje poteka z zrakom, dušikom in drugimi čistimi plini (za ostale podrobnosti in aktualne podatke glej veljavno Prilogo k akreditacijski listini LK-015 na spletni strani Slovenske akreditacije).

6 Sklepi

Na področju meroslovja pretoka plina se uporabljajo različne definicije pretoka, kot so prostorninski tok, masni tok ter standardni oz. normni prostorninski tok. Pretok plina je kompleksna merjena veličina, ki v procesu zagotavljanja merilne sledljivosti združuje navezavo na različne osnovne merske enote SI, kot so kilogram, meter, sekunda, mol, kelvin. Meroslovni laboratoriji na višji meroslovni ravni kot referenčne etalone izbirajo merilne metode, pri katerih je merilni model, to je povezava med merjeno veličino in merilnim učinkom, mogoče izraziti z osnovnimi fizikalnimi principi. Poleg izbranega referenčnega etalona na realizirano referenčno vrednost pretoka plina ključno vpliva tudi izvedba pretoč-

Tabela 1. CMC-vrednosti laboratorija LMPS na področju pretoka plina za umerjanje merilnikov/krmilnikov masnega in prostorninskega toka

Merjena veličina	Merilno območje	Kalibracijska in merilna zmogljivost (CMC)
Masni tok, q_m	1,2 mg/min do 12 mg/min 12 mg/min do 60 g/min 60 g/min do 1060 g/min	0,015 mg/min + 0,025 % q_m 0,15 % q_m 0,16 % q_m
Prostorninski tok, q_v	1 cm ³ /min do 10 cm ³ /min 10 cm ³ /min do 50 dm ³ /min 50 dm ³ /min do 900 dm ³ /min	0,013 cm ³ /min 0,13 % q_v 0,18 % q_v

nega merilnega sistema in pogoji izvedbe meritev.

V akreditiranem kalibracijskem laboratoriju LMPS imamo potrjene kalibracijske in merilne zmogljivosti (CMC) v območju majhnih in srednjih pretokov plina v merilnem razponu 1 : 900.000 (prostorninski tokovi od 1 cm³/min do 900 dm³/min oz. masni tokovi od 1,2 mg/min do 1060 g/min). Te merilne zmogljivosti uporabljamo za zagotavljanje merilne sledljivosti na nižjo meroslovno raven ter pri razvojnoraziskovalnem delu na različnih temeljnih in industrijskih projektih. Eden od srednjeročnih razvojnih načrtov laboratorija LMPS na predstavljenem področju je razširitev merilnih zmogljivosti na mikro pretoke plina do 0,1 cm³/min oz. 0,12 mg/min, s čimer bi zadostili potrebam po zagotavljanju merilne sledljivosti in razvojnoraziskovalnemu delu na merilni opremi in sistemih za merjenje pretoka puščanja oz. preverjanje tesnosti različnih procesnih sistemov in naprav.

Literatura

- [1] SIST EN ISO/IEC 17025:2005, Splošne zahteve za usposobljenost preskuševalnih in kalibracijskih laboratorijev (ISO/IEC 17025:2005).
- [2] Kutin, J., Bobovnik, G., Bajsić, I.: Dynamic effects in a clearance-sealed piston prover for gas flow measurements, *Metrologia*, Vol. 48, 2011, str. 123–132.
- [3] Kutin, J., Bobovnik, G., Bajsić, I.: Dynamic pressure corrections in a clearance-sealed piston prover for gas flow measurements, *Metrologia*, Vol. 50, 2013, str. 66–72.
- [4] Kutin, J., Bobovnik, G., Bajsić, I.: Dynamic temperature effects in a clearance-sealed piston prover for gas flow measurements, 16th Int. Flow Measurement Conf. – FLOMEKO (Paris, France), 2013.
- [5] Kutin, J., Bobovnik, G., Bajsić, I.: Direct comparison of the LMPS gas flow reference standard at ČMI in the range (2 to 44000) scm³/min, Final Report, Laboratory of [6] Measurements in Process Engineering (LMPS), Faculty of Mechanical engineering, University of Ljubljana, 2012.
- [6] Spazzini, P. G., Kutin, J., Bobovnik, G., Bajsić, I.: Bilateral gas flow comparison in the range (10 to 20000) scm³/min, Final Report, Laboratory of Measurements in Process Engineering (LMPS), Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana, 2012.
- [7] Spazzini, P. G., Piccato, A., Kutin, J., Bobovnik, G., Bajsić, I.: Comparison of MFCs between INRIM and LMPS in the range (10 to 20000) scm³/min, 8th International Symposium on Fluid Flow Measurement (Colorado Springs, USA), 2012.
- [8] Rupnik, K., Kutin, J., Bajsić, I.: A method for gas identification in thermal dispersion mass flow meters. *Strojniški Vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 60, 2014, str. 607–616.
- [9] Kutin, J., Bobovnik, G., Bajsić, I.: Analiza merilnih sistemov za merjenje puščanja izdelkov za avtomobilsko industrijo, Končno poročilo, Laboratorij za meritve v procesnem strojništvu (LMPS), Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, 2012.
- [10] Kutin, J., Rupnik, K., Bobovnik, G., Bajsić, I.: Korekcijski faktorji termičnih merilnikov za različne medicinske pline, Končno poročilo, Laboratorij za meritve v procesnem strojništvu (LMPS), Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, 2013.
- [11] Kutin, J., Bobovnik, G., Bajsić, I.: Poročilo o meritvah Kv pretočnih koeficientov filtrov za plin. Končno poročilo, Laboratorij za meritve v procesnem strojništvu (LMPS), Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, 2013.
- [12] Miller, R. W.: Flow measurement engineering handbook, McGraw-Hill, Boston, 1996.
- [13] Baker, R. C.: Flow measurement handbook: industrial designs, operating principles, performance, and applications, Cambridge University Press, 2000.
- [14] JCGM 100:2008, Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement.
- [15] EA-4/02 M: 2013, Evaluation of the uncertainty of measurement in calibration.
- [16] Padden, H.: Uncertainty analysis of a high-speed dry piston flow prover, Measurement Science Conf. (Anaheim, CA), 2002.
- [17] Padden, H.: Development of a 0.2% high-speed dry piston prover, Measurement Science Conf. (Anaheim, CA), 2003.
- [18] ISO 9300:2005, Measurement of gas flow by means of critical flow Venturi nozzles.
- [19] Wendt, G., Dietrich, H., Jarosch, B., Joest, R., Natz, B., Frössl, F., Ruwe, M.: Gas meters – Test rigs with critical nozzles, PTB Testing Instructions, Vol. 25, 1998.

Reference measurement capabilities of a metrology laboratory for the flow rate of different gases

Abstract: This paper deals with some starting points for setting up reference measurement capabilities in a metrology laboratory in the field of flow rate measurements of different gases. Basic definitions of the gas flow rate are given and backgrounds of the measurement models for determining the gas flow rate and evaluating the measurement uncertainty are discussed. As an example, the reference measurement standards and the calibration and measurement capabilities (CMC) of the accredited calibration laboratory of the authors of this paper are presented.

Keywords: gas flow metrology, measurement model, reference measurement standard, CMC