

VALIDACIJA MERILNEGA SISTEMA ZA MERJENJE PRETOKA PLINA Z LAMINARNIM TOKOVNIM ELEMENTOM

Gregor Bobovnik, Klara Arhar, Jože Kutin

Izvelek:

Merilno zaznavalo laminarnega merilnika pretoka je laminarni tokovni element, katerega pretočni preizrez sestavljajo kapilarne cevke oz. reže. V prisotnosti toka plina se v laminarnem tokovnem elementu vzpostavijo laminarne tokovne razmere, zato bi lahko v idealnih razmerah kot merilni model za določanje pretoka plina uporabili Hagen-Poiseuillovo enačbo, ki podaja linearno odvisnost masnega toka plina od tlačnega padca v laminarnem tokovnem elementu. Ker pa v praksi niso izpolnjene vse predpostavke, na katerih temelji ta enačba, uporabimo nekoliko modificiran merilni model. V prispevku bomo predstavili merilni model, ki temelji na uporabi brezdimenzijskih parametrov. Za konkreten primer je z uporabo rezultatov umerjanja prikazana postavitve tovrstnega merilnega modela in spremljajoča analiza merilne negotovosti. Predstavljeni so tudi rezultati primerjalnih meritev pretoka suhega zraka z laminarnim merilnikom in merilnim sistemom s kritičnimi merilnimi šobami. Rezultati primerjave so ovrednoteni z vrednostjo E_n in dokazujejo ustreznost merilnega modela in pripadajočih merilnih negotovosti merjenega pretoka z laminarnim merilnikom pretoka.

Ključne besede:

laminarni tokovni element, laminarni merilnik, merilni model, analiza merilne negotovosti, primerjalne meritve

1 Uvod

V laminarnem tokovnem elementu, ki predstavlja zaznavalni element laminarnega merilnika, je pretočni preizrez sestavljen iz večjega števila kapilarnih cevk ali rež, kar zagotavlja, da se pri toku plina skozi element vzpostavijo laminarne tokovne razmere. Hitrost plina je v tem primeru premo sorazmerna s padcem tlaka. Najpreprostejši merilni model za masni tok plina, merjen z laminarnim tokovnim elementom, temelji na Hagen-Poiseuillovi enačbi [1]:

$$q_{m,0} = \frac{n\pi r^4 \Delta p}{8\mu L} \quad (1)$$

ki podaja idealni masni tok $q_{m,0}$ nestisljive tekočine skozi n kapilarnih cevk okroglega prereza s polmerom r in dolžine L v odvisnosti od gostote tekočine ρ , dinamične viskoznosti μ in tlačnega padca Δp vzdolž kapilarne cevk. Izpeljava Hagen-Poiseuillove enačbe temelji na predpostavkah [2], da je tok tekočine laminaren in ustaljen, da je kapilarna cevka ravna, da je tekočina newtonska in nestisljiva, da je temperatura tekočine konstantna in hitrost tekočine ob steni

cevi enaka nič. Običajno vse našete predpostavke niso izpolnjene, ker ne poznamo dejanskega števila in dimenzij kapilar oz. dejanske oblike prereza kapilar in zaradi načina merjenja tlačnega padca (odjemi so običajno pozicionirani pred režami in za njimi), Hagen-Poiseuillove enačbe v praksi ne moremo uporabiti za določanje masnega toka z laminarnim tokovnim elementom, zato uporabljamo nekoliko modificirane merilne modele, npr. [2, 3].

Namen prispevka je predstavitev merilnega modela za določanje pretoka z laminarnim tokovnim elementom, ki temelji na uporabi brezdimenzijskih parametrov [2, 4] in njegova postavitve na osnovi rezultatov akreditiranega umerjanja z vlažnim zrakom. Podrobno je prikazan tudi postopek analize merilne negotovosti v skladu s [5]. Merilni model je nadalje validiran preko primerjalnih meritev z merilnim sistemom s kritičnimi merilnimi šobami pri merjenju pretoka suhega zraka. Izvedena analiza z uporabo vrednosti E_n [6] ponazarja, kako lahko rezultate tovrstnih primerjalnih meritev uporabimo za potrjevanje merilnih zmogljivosti.

2 Teoretične osnove

V splošnem merilni model za masni tok plina, merjen z laminarnim tokovnim elementom, zapišemo kot:

$$q_m = q_{m,0} C_D \quad (2)$$

Doc. dr. Gregor Bobovnik, univ. dipl. inž., Klara Arhar, dipl. inž. str. (UN), izr. prof. dr. Jože Kutin, univ. dipl. inž., vsi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

kjer je C_D pretočni koeficient, ki podaja odstopanje dejanskega od idealnega masnega toka. Vrednost pretočnega koeficienta ni odvisna le od konstrukcije in dimenzij laminarnega elementa, temveč tudi od velikosti pretoka oz. Reynoldsovega števila (Re), kar je povezano z dodatnimi tlačnimi izgubami na vstopu in izstopu iz laminarnega tokovnega elementa (t. i. vpliv kinetične energije [2]), s stisljivostjo plina itd.

Kot smo omenili, dejanskih dimenzij in oblike kapilarnih cevk, ki sestavljajo laminarni tokovni element, v praksi ne poznamo, zato $q_{m,0}$ in posledično C_D ne moremo določiti. Za masni oz. prostorninski tok tako uporabimo merilni model [2]:

$$q_m = \frac{\rho L^3 \Delta p}{\mu C_F} \quad \text{oz.} \quad q_v = \frac{L^3 \Delta p}{\mu C_F} \quad (3)$$

kjer je C_F koeficient pretoka, L je karakteristična dimenzija laminarnega elementa in $q_v = q_m / \rho$ prostorninski tok. Zaradi padca tlaka vzdolž kapilare se gostota, viskoznost in prostorninski tok plina, ki nastopajo v enačbi (3), spreminjajo, zato je potrebno eksplicitno podati, ali so upoštevane njihove vrednosti na vstopu, na sredini ali na izstopu iz laminarnega elementa.

Če za kapilarno cevko poljubnega prečnega preza (r v nadaljevanju definira hidravlični polmer) definiramo še koeficient C_L in koeficient viskoznosti C_μ [4]:

$$C_L = \frac{r}{L}, \quad C_\mu = \frac{\rho \Delta p l^2}{\mu^2} \quad (4)$$

in upoštevamo, da je povprečna hitrost plina v kapilarni cevki definirana z izrazom:

$$\bar{w} = \frac{\Delta p r^2}{8 \mu L} \quad (5)$$

lahko Re in C_D zapišemo kot:

$$Re = \frac{2 \rho r \bar{w}}{\mu} = \frac{1}{4} C_L C_\mu \quad \text{in} \quad C_D = \frac{q_m}{q_{m,0}} = \frac{8}{\pi} \frac{1}{C_L} \frac{1}{C_F} \quad (6)$$

Iz zgornjih enačb sta razvidni povezavi med Re in C_μ ter med C_D in C_F , zato lahko kot rezultat umerjanja laminarnega tokovnega elementa namesto $C_D(Re)$ podamo odvisnost $C_F(C_\mu)$. Dobljeno odvisnost običajno aproksimiramo s polinomom drugega reda:

$$C_F = a_0 + a_1 C_\mu + a_2 C_\mu^2 \quad (7)$$

Za karakteristično dolžino L običajno predpostavimo, da je enaka 1 m oz. nominalni dolžini laminarnega elementa. Pomembno je, da tako pri umerjanju kot pri nadaljnji uporabi laminarnega merilnika uporabljamo isto vrednost.

Pri uporabi laminarnega elementa za merjenje pretoka najprej za merjeni plin pri danih pogojih izračunamo C_μ , zatem z aproksimacijskim polinomom (7) določimo vrednost C_F , na koncu pa z uporabo enačbe (3) izračunamo masni tok q_m .

3 Analiza rezultatov umerjanja laminarnega elementa

Laminarni element izdelovalca Meriam Process Technologies (50MH1 0-01, SN: 1809000134), ki je prikazan na *sliki 1*, je bil umerjen v laboratoriju TetraTec Instruments, ki je akreditirani laboratorij pri DAkkS, Nemčija. Rezultati umerjanja so podani na poročilu o umerjanju [7] in so prikazani v *preglednici 1*. Prostorninski pretok q_v , absolutni tlak P , temperatura T in relativna vlažnost h so bili merjeni na vstopu laminarnega tokovnega elementa.

Umerjanje je bilo izvedeno z vlažnim zrakom, zato smo za izračun gostote uporabili model CIPM-2007 [8, 9] in za izračun dinamične viskoznosti zraka empirični Studnikov model [10]. Skladno s slednjim je viskoznost vlažnega zraka μ_{vz} enaka:

$$\mu_{vz} = (x_{sz} \mu_{sz} + x_v \mu_v) \left(1 + \frac{x_v - x_v^2}{2,75} \right) \quad (8)$$

kjer je x molski delež, indeksa sz in v pa predstavljata suh zrak in vodno paro. Molski delež x_v je določen na podlagi izmerjenega tlaka, temperature in relativne vlažnosti (P , T in h) z uporabo modela v [8], molski delež suhega zraka pa je enak $x_{sz} = 1 - x_v$.



Slika 1: Laminarni tokovni element z vgrajenim temperaturnim zaznavalom (na levi)

Preglednica 1 : Rezultati umerjanja laminarnega elementa [7]

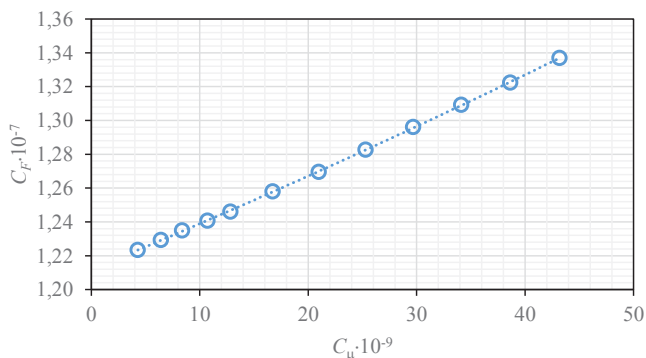
Št.	q_v	Δp	P	T	h	$U(q_v)$	$U(q_v)/q_v$
/	l/min	hPa	hPa	°C	%	l/min	%
1	27,289	1,993	967,7	23,41	47,8	0,066	0,242
2	40,578	2,978	967,7	23,44	48,0	0,098	0,242
3	52,857	3,897	967,6	23,42	48,2	0,13	0,246
4	67,195	4,977	967,6	23,41	48,1	0,16	0,238
5	80,183	5,965	967,6	23,45	47,7	0,19	0,237
6	103,557	7,779	967,5	23,51	48,1	0,25	0,241
7	128,759	9,763	967,5	23,6	48,3	0,31	0,241
8	153,625	11,767	967,4	23,53	47,9	0,37	0,241
9	178,467	13,812	967,3	23,51	47,6	0,43	0,241
10	203,015	15,87	967,3	23,48	47,8	0,49	0,241
11	227,400	17,949	967,2	23,34	47,6	0,55	0,242
12	251,442	20,066	967,0	23,34	45,8	0,61	0,243

Viskoznosti suhega zraka in vodne pare so bile določene z uporabo baze REFPROP [11].

Za dolžino L smo privzeli razdaljo med tlačnima odjemoma na laminarnem elementu, ki je enaka 8 cm. Izračun koeficientov C_F in C_μ , ki ju določimo z uporabo enačb (3) in (4), temelji na vrednostih veličin na vstopu v laminarni tokovni element. Njune vrednosti v kalibracijskih točkah so prikazane na *sliki 2*, kjer je s črtkano črto prikazana tudi aproksimacija dobljenih rezultatov s polinomom drugega reda. Konstante aproksimacijskega polinoma drugega reda v skladu z enačbo (7) so enake:

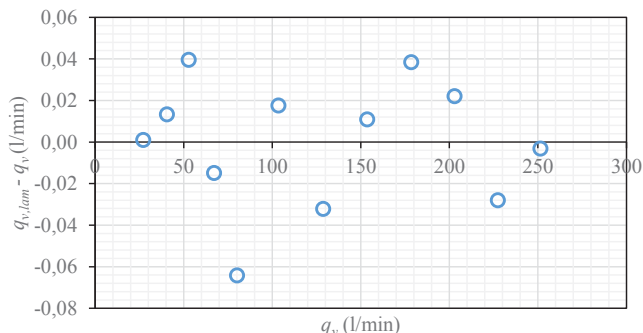
$$a_0 = 1,2119 \cdot 10^7, a_1 = 2,6459 \cdot 10^{-5}, a_2 = 5,7919 \cdot 10^{-17} \quad (9)$$

Na *sliki 3* je prikazano še odstopanje vrednosti prostorninskega toka ($q_{v,lam}$), dobljenega z uporabo merilnega modela (3), od referenčne vrednosti prostorninskega toka (q_v) na vstopu v laminarni merilnik. Merilna negotovost polinomske aproksimacije druge stopnje (število aproksimiranih parametrov $k = 3$) na podlagi dvanajstih ($N = 12$) merilnih točk je ocenjena kot:



Slika 2 : Odstopnost C_F od C_μ

(10)



Slika 3 : Odstopanja $q_{v,lam}$ od q_v

Merilno negotovost dobljenih vrednosti koeficienta pretoka C_F izračunamo kot:

$$\frac{U(C_F)}{C_F} = 2 \frac{u(C_F)}{C_F} = 2 \sqrt{\left(\frac{1}{2} \frac{U(q_v)}{q_v}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta p)}{\Delta p}\right)^2 + \left(\frac{u(\mu_{vz})}{\mu_{vz}}\right)^2 + \left(\frac{u_{apr}(C_F)}{C_F}\right)^2} \quad (11)$$

kjer so posamezni viri povezani z negotovostjo določanja referenčnega prostorninskega toka (glej preglednico 1), z negotovostjo merjenja tlačnega padca, negotovostjo določanja viskoznosti vlažnega zraka pri umerjanju in negotovostjo uporabljene polinomske aproksimacije v enačbi (9).

Standardna negotovost merjenja tlačnega padca znaša [7]: $u(\Delta p) = 7,5 \cdot 10^{-4} p$ ali 0,375 Pa.

Pri določanju negotovosti viskoznosti upoštevamo vpliv negotovosti Studnikovega modela [10], ki znaša približno $u(\mu_{vz,Studnikov})/\mu_{vz} = 0,05 \%$, in prispevek negotovosti merjenja temperature (standardna negotovost 0,1 °C) na določanje viskoznosti, ki znaša pri pogojih okolice približno 0,03 %. Pri izračunu ne upoštevamo negotovosti vrednosti viskoznosti suhega zraka in vodne pare, vezani na bazo REFPROP, ki lahko prispevata tudi 0,5 % ali več. To je upravičeno, kadar tudi pri nadaljnjih meritvah pretoka z laminarnim tokovnim elementom uporabimo isti medij (zrak) in isti model (REFPROP) kot pri umerjanju. V primeru uporabe drugega medija oz. drugega modela je potrebno ta prispevek negotovosti vključiti v analizo negotovosti merjenega pretoka.

Vrednosti ρ_{vz} , μ_{vz} , C_μ , C_F in $U(C_F)/C_F$ so podane v *preglednici 2*.

Preglednica 2 : Izračunane vrednosti ρ_{vz} , μ_{vz} , $q_m C_\mu$ in C_F

Št.	ρ_{vz}	μ_{vz}	$C_\mu \cdot 10^{-9}$	$C_F \cdot 10^{-7}$	$U(C_F)/C_F$
/	kg/m ³	μPa s	/	/	%
1	1,131	18,339	4,289	1,2234	0,47
2	1,131	18,341	6,407	1,2292	0,37
3	1,131	18,340	8,385	1,2350	0,34
4	1,131	18,339	10,710	1,2407	0,31
5	1,131	18,341	12,832	1,2460	0,31
6	1,130	18,344	16,724	1,2580	0,31
7	1,130	18,348	20,972	1,2695	0,31
8	1,130	18,345	25,290	1,2827	0,31
9	1,130	18,344	29,688	1,2960	0,31
10	1,130	18,343	34,120	1,3092	0,31
11	1,131	18,336	38,634	1,3224	0,31
12	1,131	18,338	43,184	1,3369	0,31

4 Primerjalne meritve

Validacijo postavljenega merilnega modela laminarnega tokovnega elementa smo izvedli na podlagi primerjalnih meritev masnega toka suhega zraka z merilnim sistemom s kritičnimi šobami. Merilna sistema sta bila vezana zaporedno. Meritve so bile izvedene s suhim zrakom, vse snovske in transportne lastnosti zraka pa so bile določene z uporabo baze REFPROP.

Meritve smo izvedli v devetih merilnih točkah v merilnem območju med 28 g/min in 300 g/min. Pri vsaki vrednosti pretoka smo izvedli najmanj tri ponovitve. Meritve so bile izvedene v okviru zaključne naloge univerzitetnega študija [12], kjer je podrobneje opisan tudi nadzorni program za zajemanje in shranjevanje podatkov.

4.1 Merilni sistem z zvočnimi šobami

Merilni sistem je sestavljen iz seta kritičnih šob, merilnika absolutnega tlaka in merilnika temperature plina. Merilni sistem v LMPS v območju od 0,6 g/min do 60 g/min uporabljamo kot delovni etalon, v območju od 60 g/min do 1080 g/min pa kot referenčni etalon. Podrobnosti o uporabljeni merilni opremi in merilni zmogljivosti merilnega sistema so podane v preglednici 3. Masni tok, izmerjen s kritičnimi šobami, je označen s $q_{m,ks}$, njegova vrednost pa je določena kot povprečna vrednost desetih zaporednih odčitkov.

4.2 Merilni sistem z laminarnim tokovnim elementom

Merilni sistem oz. laminarni merilnik je sestavljen iz laminarnega tokovnega elementa, merilnika tlačne razlike, merilnika absolutnega tlaka in merilnika

Preglednica 3 : Podatki o komponentah merilnega sistema s kritičnimi merilnimi šobami

Elementi	kritične šobe & merilnik absolutnega tlaka & sistem za merjenje temperature
Izdelovalec	TetraTec Inst. & Mensor & TetraTec Inst. + Pico Technology
Tip	CFO-10-A-302 & CPG2500 + CPR2550 & HUMTMP-MF-G12 + PT-104
Merilno območje	(0,6-1080) g/min
CMC ($k = 2$)	0,30 % MV ($q_m < 60$ g/min) 0,18 % MV ($q_m \geq 60$ g/min)

temperature plina. Podrobnosti o uporabljeni merilni opremi so podane v *preglednici 4*.

Masni tok, merjen z laminarnim merilnikom ($q_{m,lam}$), izračunamo z uporabo enačbe (3), pri čemer je C_F laminarnega elementa definiran pri njegovih vstopnih pogojih. Izmerjena vrednost masnega toka je določena kot povprečna vrednost desetih zaporednih odčitkov.

Merilna negotovost masnega toka plina je enaka:

$$\frac{U(q_{m,lam})}{q_{m,lam}} = 2 \sqrt{\left(\frac{u(C_F)}{C_F}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta p)}{\Delta p}\right)^2 + \left(\frac{u(\rho)}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{u(\mu)}{\mu}\right)^2} \quad (13)$$

kjer so posamezni viri na desni strani enačbe definirani kot:

- ▶ merilna negotovost $u(C_F)$ je podana v Preglednici 2 (v območju manjših pretokov, kjer vrednost merilne negotovosti $u(C_F)$ ni konstantna, smo uporabili vrednosti negotovosti, določene z linearno interpolacijo tabeliranih vrednosti);
- ▶ merilna negotovost merjenja tlačne razlike $u(\Delta p)$ je izračunana na podlagi podatkov o merilni opremi v Preglednici 4;
- ▶ merilna negotovost gostote suhega zraka, ki temelji na uporabljeni merilni opremi, je enaka $u(\mu)/\mu = 0,04$ % (glej [5]);
- ▶ merilna negotovost določanja viskoznosti suhega zraka je enaka $u(\mu)/\mu = 0,03$ %. Ta vrednost zajema le vpliv negotovosti določanja temperature zraka (0,1 °C), ne upošteva pa merilne negotovosti merilnega modela. Slednjega ne upoštevamo, ker sta vrednosti viskoznosti zraka pri meritvah in vrednosti viskoznosti vlažnega zraka, uporabljenega pri postavitvi merilnega elementa, korelirani, saj smo v obeh primerih za določanje viskoznosti posameznih komponent uporabili bazo REFPROP.

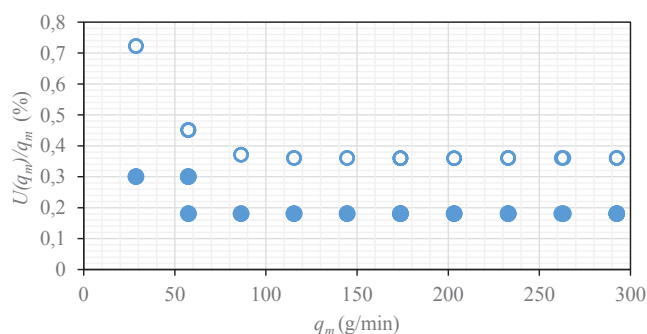
Preglednica 4 : Podatki o posameznih komponentah laminarnega merilnika

Naziv	Laminarni tokovni element	Temperaturno zaznavalo; merilni pretvornik	Merilnik tlaka	Merilnik tlačne razlike
Izdelovalec	Meriam Process Technologies	TetraTec Instruments; Pico Technology	Mensor	Mensor
Tip	50MH10-01	HUMTMO-MF-G12; PT-104	CPG2500; CPR2550	CPT6100
Merilno območje	25...300 l/min	18...28 °C	0...300 kPa	0...2,5 kPa
Merilna negotovost ($k = 2$)	0,31 %...0,47 %	0,2 °C	60 Pa	0,1 % ali 1 Pa

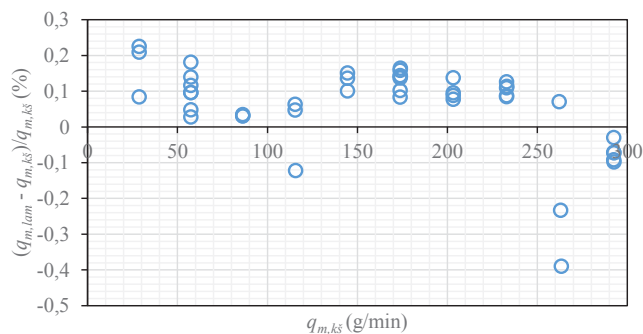
Na *sliki 4* je prikazana razširjena merilna negotovost merjenja masnega toka z laminarnim merilnikom. Merilna negotovost merjenega pretoka z laminarnim merilnikom znaša pri pretokih, večjih od 100 g/min, približno 0,36 %, pri najmanjšem merjenem pretoku pa naraste na dobrih 0,70 %, kar je posledica večje relativne merilne negotovosti tlačne razlike v tem območju. Primerjalno je prikazana tudi merilna negotovost merjenega masnega toka za merilni sistem s kritičnimi merilnimi šobami, ki je vedno manjša od merilne negotovosti laminarnega merilnika. Za merilni sistem s kritičnimi šobami sta pri pretoku 60 g/min podani dve različni vrednosti merilne negotovosti, ker smo za izvedbo meritev pri tem pretoku uporabili dve različni kritični šobi z različno merilno negotovostjo.

4.3 Rezultati meritev

Na *sliki 5* so prikazana relativna odstopanja med masnim tokom, merjenim z laminarnim merilnikom, in merilnim sistemom s kritičnimi šobami. Kot vidimo, so dobljena relativna odstopanja v vseh primerih manjša kot 0,4 % merjenega pretoka, v večini primerov pa je masni tok, izmerjen z laminarnim merilnikom, večji od masnega toka, izmerjenega z merilnim sistemom s kritičnimi šobami. Pri pretoku približno 262 g/min so opazna večja odstopanja in slabša ponovljivost meritev, kar je najverjetneje posledica nezadostnega časa stabilizacije oz. posledica neustaljenih tlačnih ali temperaturnih razmer pred izvedbo meritev pri tem pretoku. Večje število



Slika 4 : Razširjena merilna negotovost merjenega pretoka z laminarnim merilnikom (O) in merilnim sistemom s kritičnimi merilnimi šobami (•)



Slika 5 : Relativno odstopanje med masnim tokom, merjenim z laminarnim merilnikom, in merilnim sistemom s kritičnimi šobami

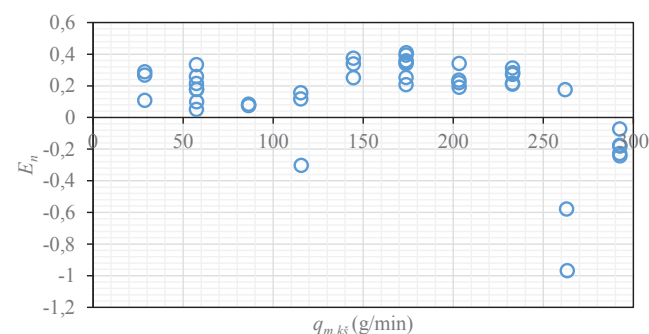
merilnih točk pri pretoku 60 g/min je posledica izvedbe meritve z dvema kritičnima šobama, katerih merilni območji se prekrivata (z vsako so bile narejene tri ponovitve).

Za ovrednotenje rezultatov primerjalnih meritev smo uporabili vrednost E_n , ki se pogosto uporablja v analizi rezultatov medlaboratorijskih primerjav [6]:

$$E_n = \frac{q_{m,lam} - q_{m,kš}}{\sqrt{U(q_{m,lam})^2 + U(q_{m,kš})^2}} \quad (14)$$

Kadar je vrednost E_n manjša ali enaka ena, so rezultati primerjalnih meritev skladni (v skladu s podanimi merilnimi negotovostmi).

Na *sliki 6* so prikazane vrednosti E_n za vse izvedene



Slika 6 : Vrednosti števila E_n

meritve masnega toka. Kot vidimo, absolutna vrednost E_n le v enem primeru presega vrednost ena, in sicer pri pretoku 262 g/min, kjer je bila opažena slaba ponovljivost izmerkov. Za 41 od skupno 43 merilnih točk je vrednost $|E_n| < 0,5$. Rezultati tako potrjujejo ustreznost uporabljenega merilnega modela in ovrednotenih merilnih negotovosti merjenja pretoka z laminarnim merilnikom pretoka plina.

5 Zaključek

Prispevek podaja merilni model za določanje pretoka z laminarnim tokovnim elementom, ki temelji na uporabi brezdimenzijskih parametrov. Postavitev merilnega modela je izvedena za laminarni tokovni element na podlagi rezultatov umerjanja z vlažnim zrakom v tujem akreditiranem kalibracijskem laboratoriju v merilnem območju med približno 25 g/min in 300 g/min. Podrobno je predstavljena tudi analiza merilne negotovosti merjenega masnega toka plina (zraka).

Laminarni merilnik pretoka smo validirali z izvedbo primerjalnih meritev masnega toka suhega zraka z merilnimi sistemom s kritičnimi merilnimi šobami, ki jih v laboratoriju LMPS uporabljamo kot referenčni (v spodnjem območju pretokov tudi kot delovni) etalon. Rezultati medsebojne primerjave kažejo, da je absolutna vrednost E_n v vseh merilnih točkah, z izjemo ene, manjša od ena. Več kot 95 % merilnih točk ima vrednost $|E_n| < 0,5$. Rezultati potrjujejo ustreznost uporabljenega merilnega modela in podanih merilnih negotovosti merjenega pretoka z laminarnim merilnikom pretoka v njegovem celotnem merilnem območju.

Literatura

- [1] Durst, F.: Fluid Mechanics, An Introduction to the theory of fluid flows, Springer-Verlag

- Berlin Heidelberg, 2008.
- [2] Wright, J. D., Cobu, T., Berg, R. F., Moldover, M. R.: Calibration of laminar flow meters for process gases, Flow Measurement and Instrumentation 25/2012, str. 8-14.
- [3] Koeroghlian, M., Hall, M. J., Matthews, R.: Calculating a Viscosity Correction for Humid Air in a Laminar Flow Element, SAE Technical Paper 2018-01-0206, 2018.
- [4] Wright, J. D.: The long term calibration stability of critical flow nozzles and laminar flow meters, National conference of standards laboratories conference proceedings 1998, str. 443-462.
- [5] JCGM 100:2008: Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement.
- [6] SIST EN ISO/IEC 17043:2010 Ugotavljanje skladnosti - Splošne zahteve za preskušanje strokovne usposobljenosti.
- [7] TetraTec Instruments: Calibration Certificate No. 12309, O-K-17589-01-00, 2018-09, Nemčija, 2018.
- [8] Picard, A., Davis, R.S., Gläser, M., Fujii, K.: Revised formula for the density of moist air (CIPM-2007), Metrologia 45/2008, str. 149-155.
- [9] Kutin J.: Snovske in transportne lastnosti plinov (PP-A), Navodilo za delo, Izdaja 1, LMPS, 2011.
- [10] Studnikov, E.L.: The Viscosity of moist air, Journal of Engineering Physics 19/1970, str. 1036-1037.
- [11] Lemmon, E. W., Huber, M. L., McLinden, M. O.: NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties - REFPROP Version 9.0 (User's Guide), Thermophysical Properties Division, NIST, 2010.
- [12] Arhar, K.: Izvedba in analiza merilnega sistema za pretok plina z laminarnim merilnikom. Zaključna naloga 1. stopnje univerzitetnega študija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, 2019.

Validation of the gas flow rate measuring system with the laminar flow element

Abstract:

The main component of a laminar flowmeter is a laminar flow element, which cross-section is made of capillary passages. The gas flows through the passageway under laminar conditions, therefore the Hagen-Poiseuille equation, in which the gas mass flow rate and the pressure drop are linearly related, could be in the ideal conditions used as the measurement model. However, the assumptions on which this equation is based on are not assured in praxis, therefore slightly modified models are applied. This article presents the measurement model based on non-dimensional parameters. Based on calibration results, the realization of such measurement model and detailed evaluation of its measurement uncertainty is shown for a concrete example. Further, the results of comparative measurements of dry gas flow rate using the laminar flowmeter and the measuring system with sonic nozzles are presented. The results are evaluated using the En number and prove the adequacy of the measurement model and respective measurement uncertainties of the measured flow rate with the laminar flowmeter.

Keywords:

laminar flow element, laminar flowmeter, measurement model, evaluation of measurement uncertainty, comparison measurements