

Merenje protoka pomoću mernih blendi - poređenje rezultata proračuna protoka prema standardima ISO 5167:1989 i ISO 5167:2007

Merenje protoka fluida je jedno od osnovnih merenja koje se obavlja u procesnoj tehnici, termotehnici, energetici i mnogim drugim oblastima tehnike. Zavisno od potreba potrebno je odabrati odgovarajući metod, kojim može da se sprovede merenje na najjednostavniji način, uz dovoljnu tačnost, i uz najmanje ometanje tehnološkog postupka. Merenje protoka pomoću mernih blendi se svodi na ugradnju merne blende u cevovod kružnog preseka i posredno utvrđivanje protoka merenjem razlike pritisaka ispred i iza blende. Ovaj metod je veoma čest u industrijskoj praksi, jer je normiran kroz standarde kao što su npr. SRPS EN ISO 5167:2012 „Merenje protoka fluida pomoću uređaja sa diferencijalnim pritiskom ugrađenih u cevovode kružnog poprečnog preseka - Deo 1: Opšti principi i zahtevi“ koji je identičan sa EN ISO 5167-1:2003 ili ASME MFC-14M-2001 „Measurement of fluid flow using small bore precision orifice meters“.

Proračunska procedura pomoću koje se izračunava protok fluida je u važećem standardu SRPS EN ISO 5167:2012 drugačija nego u prethodnim izdanjima istog standarda 1980., 1989., 1993., kao i iz 1998. Imajući ovo u vidu postavlja se pitanje da li se i za koliko razlikuju izračunati protoci fluida, pa je u ovom radu analizirano nekoliko konkretnih slučajeva. U pitanju su merenja na industrijskim instalacijama, kao i merenja obavljena u Laboratoriji za procesnu tehniku na Mašinskom fakultetu u Beogradu.

1 Merenje protoka pomoću merne blende

Na slici 1 prikazana je merna blenda. Instalisanjem merne blende u sistem svesno se stvara razlika statičkih pritisaka ispred i iza same blende, koja je uzrokovana strujanjem fluida kroz suženi otvor prečnika d , pri čemu se protok računa po formuli:

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p \rho}$$

gde su:

ρ_1 – gustina fluida ispred blende, [kg/m³],

ε – koeficijent ekspanzije,

Δp – diferencijalni pritisak na blendi, [Pa],

C – faktor isticanja,

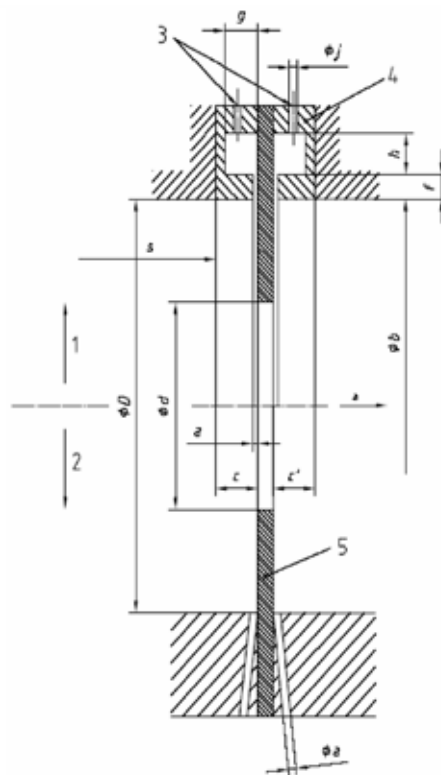
$\beta = d/D$ – odnos prečnika otvora blende i unutrašnjeg prečnika cevovoda,

D – unutrašnji prečnik cevi, [m],

d – prečnik otvora blende, [m].

Koeficijent ekspanzije (ε) koristi se kao popravka u jednačini

protoka kada je fluid koji protiče kroz blendu stišljiv (para ili gas). Pare i gasovi prilikom prolaska kroz blendu usled prigušivanja menjaju gustinu. Koeficijent ekspanzije ε jednak je jedinici za tečnosti koje smatramo nestišljivim fluidima, dok kod stujanja para i gasova, što je veća razlika pritisaka na blendi, to je njegova vrednost manja od 1. Osim od vrednosti razlike pritisaka, koeficijent ekspanzije ε zavisi i od eksponenta adijabate κ .



Slika 1: Merna blenda (1 – piježometarski prsten sa prorezom, 2 – pojedinačni otvori, tj otvori u uglu, 3 – priključci za diferencijalni manometar, 4 – piježometarski prsten, 5 – merna blenda)

Koeficijent protoka α određuje se eksperimentalno i odnosi se na potpuno glatke cevi i na oštar ulazni rub merne blende. U praksi su cevi često hrapave, a rub merne blende je oštećen ili zaobljen. Time se ostvaruju nestandardni uslovi, a njihov uticaj na koeficijent α je relativan i zavisi od vrednosti prečnika D . Što je prečnik cevi

D veći, to je relativna hrapavost manja, a time je i njen uticaj manji. Uvode se odgovarajući korekcionni koeficijenti da bi se ovi uticaji kompenzovali, i to za hrapavost cevi, kao i koeficijent za zaobljenost ulaznog ruba.

Prema DIN 1952 standardu rub merne blende mora biti oštar, a cev ispred prigušnice mora biti glatka. Prilikom proračuna se zbog toga ne vrše nikakve korekcije koeficijenta protoka, koji je matematički dat kao

$$\alpha = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}}$$

Prilikom proračuna mernih blendi po standardima iz 1989. i 2007. godine najveće razlike se dobijaju upravo za vrednosti hrapavosti cevovoda, ali one ne utiču bitnije na koeficijent protoka α , kao ni na faktor isticanja C , pa samim ti ni na proračun protoka.

Faktor isticanja prema standardu ISO 5167:2007 definiše se kao

$$C = 0,5961 + 0,0261\beta^2 - 0,216\beta^8 + 0,000521\left(\frac{10^6\beta}{Re_D}\right)^{0,7} + (0,0188 + 0,0063A)\beta^{3,5}\left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0,3} + (0,043 + 0,080e^{-10L_1} - 0,123e^{-7L_1})(1 - 0,11A)\frac{\beta^4}{1 - \beta^4} - 0,031(M'_2 - 0,8M_2^{1,1})\beta^{4,3} + M$$

Kada je prečnik cevovoda $D > 71,12$ mm, poslednji član gornjeg izraza jednak je nuli, tj.

$$M = 0,011(0,75 - \beta)\left(2,8 - \frac{D}{25,4}\right) = 0$$

gde ostali članovi predstavljaju

Re_D – Reynoldsov broj računat u odnosu na prečnik cevovoda,

L_1, L_2' – udaljenost mernog priključka od blende (uzvodnog i nizvodnog, respektivno), a vrednosti za M_2' i A su

$$M_2' = \frac{2L_2'}{1 - \beta}$$

$$A = \left(\frac{19000\beta}{Re_D}\right)^{0,8}$$

Koeficijent ekspanzije određuje se na osnovu ISO 5167:2007 kao

$$\varepsilon = 1 - (0,351 + 0,256\beta^4 + 0,93\beta^8)\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{k}}\right]$$

Prema standardu ISO 5167:1989 faktor isticanja definiše se kao

$$C = 0,5959 + 0,0312\beta^{2,1} - 0,184\beta^8 + 0,0029\beta^{2,5}\left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0,75} + 0,09L_1\beta^4(1 - \beta^4)^{-1} - 0,0337L_2'\beta^3$$

a koeficijent ekspanzije jednak je

$$\varepsilon = 1 - (0,41 + 0,35\beta^4)\frac{\Delta p}{\kappa p_1}$$

Navodi se važna napomena da se računa sa svim parametrima i ograničenjima za upotrebu definisanim prema datom standardu (ISO 5167:2007, kao i za ISO 5167:1989).

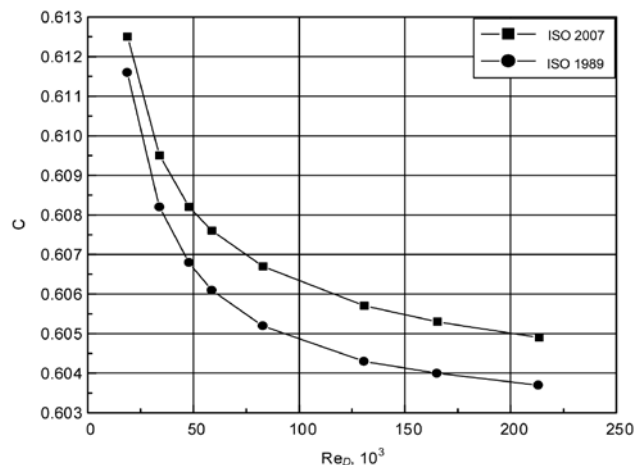
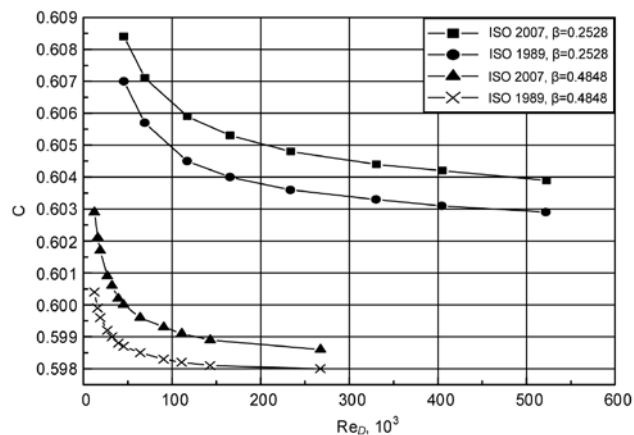
2 Poređenje rezultata proračuna protoka

U cilju određivanja odstupanja vrednosti dobijenih proračunom na osnovu ova dva standarda, korišćena su merenja odgovarajućih parametara merodavnih za definisanje protoka sledećih fluida: ulje, toluen i vazduh.

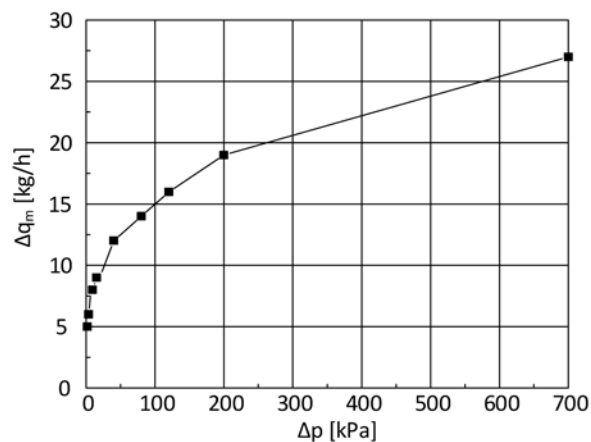
Na slici 2 prikazana je zavisnost faktora isticanja od Reynoldsovog broja Re_D (u odnosu na prečnik cevovoda). Urađeni su paralelni proračuni po novom i starom standardu za blende sa priključcima u uglu, koje su postavljene na cevovode prečnika DN80 datog postrojenja.

Na slici 2a vidi se promena faktora isticanja za merne blende sa prečnikom otvora $d = 40$ mm i $d = 21,3$ mm (na istom mernom mestu simulirane obe merne blende). Procesni fluid je toluen u tečnom stanju na radnoj temperaturi 50°C . Na slici 2b data je ova zavisnost za mernu blendu sa prečnikom otvora $d = 40$ mm pri proticanju ulja INA Termanol 32 na radnoj temperaturi 250°C .

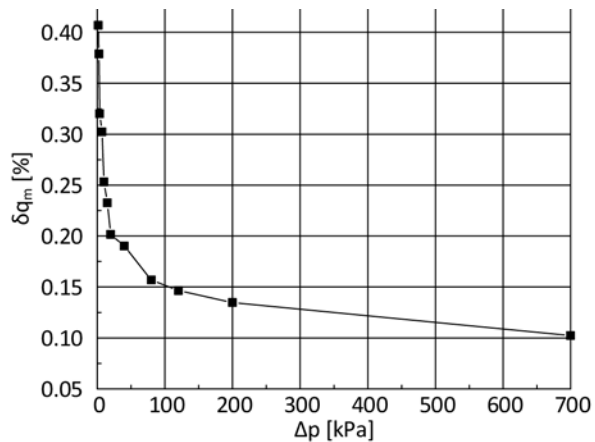
U posmatranom opsegu Reynoldsovih brojeva primetna su odstupanja vrednosti faktora isticanja za oba fluida, pri čemu se može uočiti da se dobijaju veće vrednosti po novom standardu, kao i pri manjim Re_D kod oba standarda. S obzirom da koeficijent protoka blende linearno zavisi od faktora isticanja, zaključuje se da će karakter krivih $\alpha - Re_D$ biti isti kao i odgovarajuće promene faktora isticanja.



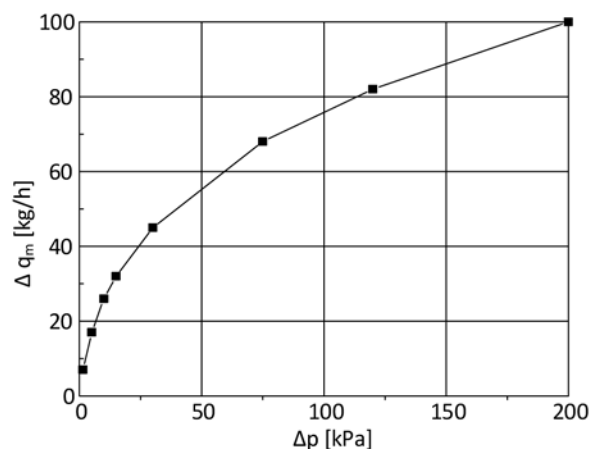
Slika 2: Zavisnost faktora isticanja od Re_D : gore (a) za toluen, dole (b) za ulje



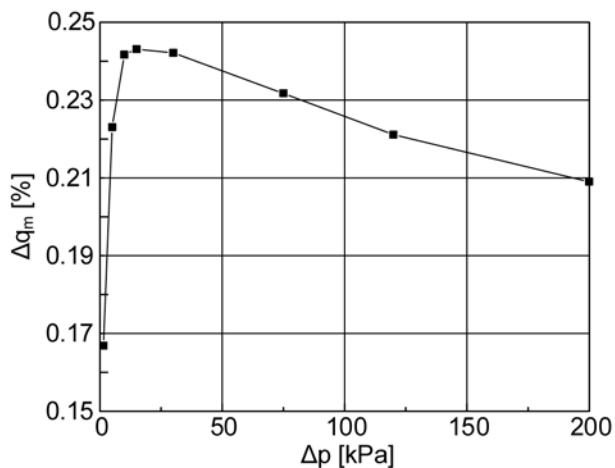
(a)



(b)



(c)



(d)

Slika 3: Zavisnost greške pri proračunu masenog protoka od razlike pritiska na blendi a) apsolutna greška i b) relativna greška za toluen, c) apsolutna greška i d) relativna greška za ulje

Uzrokovano upravo ovim razlikama vrednosti faktora isticanja i koeficijenta protoka dobijaju se i ukupne razlike u masenim (zapremniskim) protocima. To se najbolje primećuje na osnovu slike 3 na kojoj su prikazane apsolutna i relativna greška pri računanju merodavnih protoka na osnovu merenja diferencijalnog pritiska na blendama $d = 21,3$ mm za toluen i $d = 40$ mm za ulje pri prethodno definisanim radnim uslovima,

gde je apsolutna greška računata kao

$$\Delta q_m = q_{m, \text{novi}} - q_{m, \text{stari}}$$

a relativna greška je

$$\delta q_m = \frac{\Delta q_m}{q_{m, \text{novi}}}$$

$q_{m, \text{novi}}, q_{m, \text{stari}}$ [kg/h] – maseni protoci sračunati po novom, odnosno starom standardu.

Sa slike 3a i 3c se vidi da se apsolutna greška sa povećanjem protoka značajno povećava. Na slici 3b za posmatrani opseg proto-

ka toluena relativna greška je u intervalu od 0,1 do 0,4 %. Primetno je da se sa povećanjem protoka smanjuje, u početku naglo, a zatim sve blaže, dok na slici 3d kriva zavisnosti relativne greške pri datom opsegu protoka ulja ima drugačiji tok, a njena vrednost je u granicama 0,15 do 0,25 %.

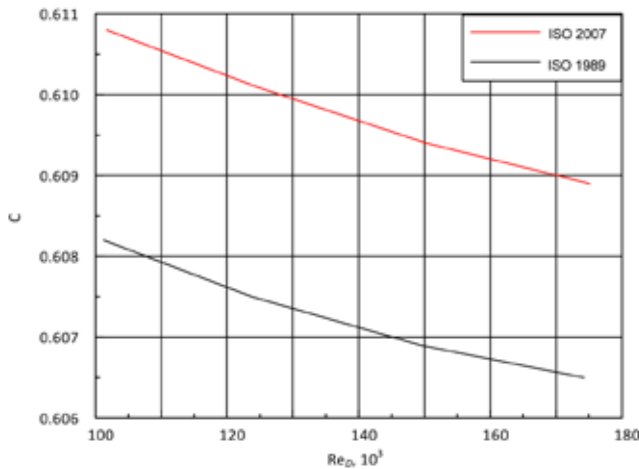
Slične promene se dobijaju i prilikom određivanja protoka vazduha, što se može uočiti na dijagramu sa slike 4.

Napominje se da su merenja protoka vazduha izvršena na instalaciji u Laboratoriji za procesnu tehniku, Mašinskog fakulteta u Beogradu. Kanal za protok vazduha je kružnog poprečnog preseka unutrašnjeg prečnika 150 mm, dok je merna blenda sa prečnikom otvora $d = 94,8$ mm.

Pri povećanju diferencijalnog pritiska vidi se sa slike 4 da vrednosti faktora isticanja opadaju, pri čemu su vrednosti dobijene po novom standardu veće.

Zavisnost promene apsolutne i relativne greške masenog protoka vazduha od diferencijalnog pritiska prikazana je na slici 5. U opsegu Δp razmatranom u ovom radu primetno je da sa njegovim povećanjem raste apsolutna greška (slika 5a), dok relativna greška

u početku raste, dostižući maksimalnu vrednost od 0.51 % pri vrednosti $\Delta p \approx 1600$ Pa, a zatim blago opada do približno konstantne vrednosti (slika 5b).



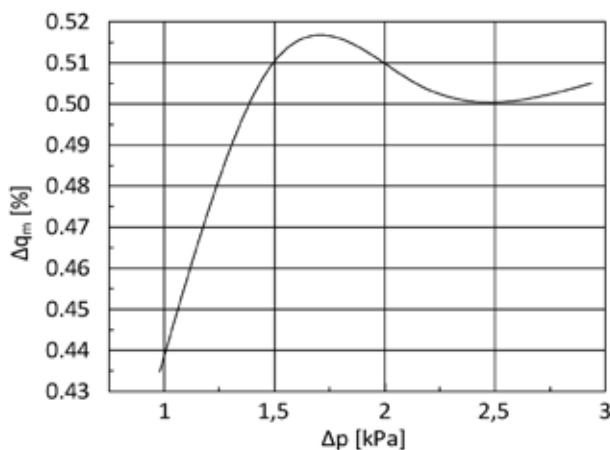
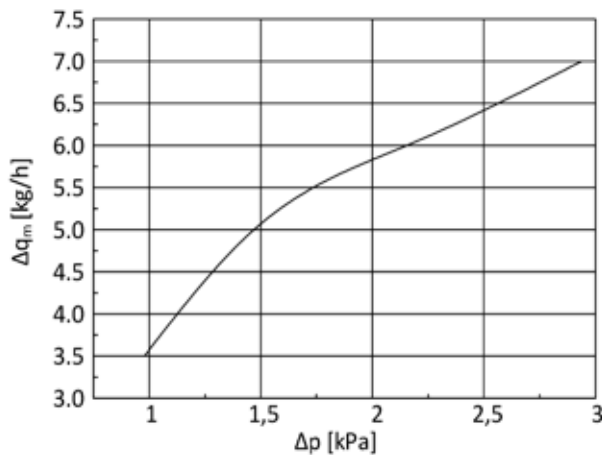
Slika 4: Zavisnost faktora isticanja od razlike pritiska na blendi

3 Diskusija i zaključak

Posmatrajući dobijene rezultate može se zaključiti da faktor isticanja ima sličan karakter promene za različite fluide pri povećanju Reynoldsovog broja Re_D (u odnosu na prečnik cevovoda), odnosno diferencijalnog pritiska. Vrednosti dobijene na osnovu novog standarda su veće. Iako ova odstupanja nisu velika, utiču na promenu masenog protoka. S obzirom da su vrednosti relativne greške (računate u odnosu na novi standard) prihvatljive u inženjerskoj praksi, može se zaključiti da nema značajnijih odstupanja vrednosti protoka dobijenih proračunima.

Literatura

- [1] Standard ISO 5167:2007
- [2] Standard ISO 5167:1989
- [3] Bogner, M., Jaćimović, B.: *Praktikum iz osnova tehnoloških procesa i aparata*, Mašinski fakultet, Beograd, 1993.
- [4] http://www.agroultrapstop.com/pdf/Tehnicki%20informacii/INA_Termanol_32.pdf
- [5] <http://avcovalve.com/products/pdf/8000.pdf>



Slika 5: Zavisnost greške pri proračunu masenog protoka vazduha od razlike pritiska na blendi: a) apsolutna greška i b) relativna greška

Autori

Uroš Milovančević,
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet,
Kraljice Marije 16,
11120 Beograd
umilovancevi@mas.bg.ac.rs

Milena Stojković,
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet,
Kraljice Marije 16,
11120 Beograd
mstojkovic@mas.bg.ac.rs

Miloš Mihailović,
Visoka inženjerska škola strukovnih studija – Tehnikum Taurunum,
Ulica Nade Dimić 4,
Zemun, 11080 Beograd
milos.m.mihailovic@gmail.com