



N. Bolf*

Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije
Sveučilišta u Zagrebu
Zavod za mjerenja i automatsko vođenje procesa
Savska cesta 16/5a, 10 000 Zagreb

Mjerenje protoka mjerjenjem razlike tlaka

Mjerenje protoka iz razlike tlaka (engl. *differential pressure* – DP) jedan je od najčešćih načina mjerenja protoka u zatvorenim cijevima. Ova mjerila određuju brzinu protjecanja iz razlike tlaka između uzvodne (visoke) i nizvodne (niske) strane mjernog elementa. Svestrana su i mogu se konfigurirati za složena mjerenja protoka kada primjena ostalih tehnologija nije prikladna. Tražena su zbog fleksibilnosti, jednostavnosti i dugog iskustva u primjeni.

Povijest mjerenja protoka iz razlike tlaka

Protjecanje tekućine bilo je oduvijek važno za čovjekov život i opstanak. Drevni Egipćani predviđali su žetve na temelju relativne razine proljetnih poplava Nila. Stoljećima kasnije, kada su Rimljani napravili akvadukte za prijenos vode u gradove za čišćenje, kupke i sanitarije, potreba za mjerenjem protoka znatno je porasla. Rimski tehničari primjenjivali su protok kroz zaslon ili prelijevanje preko prepreka kako bi približno izmjerili protok.

Newtonovo otkriće gravitacije 1687. godine unaprijedilo je mjerenje protoka tako da su ostvarena predvidljiva i ponovljiva mjerenja. Fizičari i matematičari počeli su formulirati teoriju o gibanju i silama u tekućinama. Iz toga se razvio niz instrumenata koji su mogli kvantificirati protjecanje.

Razlozi dugovječnosti tog načina mjerenja su:

- dobro poznati zakoni fizike, dinamike fluida i hidraulike na kojima se zasniva taj način mjerenja;
- duga povijest mjerenja, a time mnogo iskustva i različitih izvedbi; u više od 100 godina proizvodnje razvio se velik i raznolik katalog standardnih, ali i specifičnih osjetljivih elemenata, instrumentacije i načina instalacije sve do novih električnih i digitalnih tehnologija.
- neprestano se poboljšavaju, a najnovije tehnologije postižu visoku točnost i pouzdanost.

Bernoullijeva jednadžba

Švicarski matematičar Daniel Bernoulli (1700. – 1782.), čije je istraživanje hidrodinamike (tj. sila koje djeluju na tekućine ili koje uzrokuju tekućine) bilo usredotočeno na načelo očuvanja energije, ostvario je prvi ključni iskorak. Bernoulli je eksperimentirao s mjerenjem tlaka tekućine i odnosom tlaka i protoka. To nas je dovelo do poznatog Bernoullijeva načela koje kaže da povećanje brzine tekućine rezultira istodobnim padom tlaka tekućine (tj. potencijalne energije).



Zaključak rada koji je definirao Bernoullijevo načelo kaže da zbroj svih energija tekućina u protoku – i kinetičke i potencijalne energije – ostaje stalan. Proizlazi iz primjene zakona o očuvanju energije na tok fluida. Odatle se dobije:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h + p = \text{konst.}$$

Ovo vrijedi za vodoravni tok, gdje je p tlak, ρ gustoća i v brzina fluida u nekoj točki, a h visina težišta poprečnog presjeka fluida u odnosu na neku vodoravnu ravninu. Prema tome, ondje gdje je brzina tekućine veća, tlak je manji, a ondje gdje je brzina tekućine manja, tlak je veći.

Iako se ova relacija primjenjuje u praksi, radi se o aproksimaciji koja vrijedi za idealne tekućine. Stvarne tekućine su viskozne, što stvara lokalne gubitke energije koji nisu obuhvaćeni Bernoullijevom jednadžbom. Unatoč tom ograničenju, suvremena mjerila protoka primjenjuju ovu jednadžbu za računanje protoka s korekcijama shodno stvarnoj prirodi tekućine.

Na temelju Bernoullijeva rada razvijeni su i drugi koncepti. Na primjer, tok duž krila i mehanizam podizanja zrakoplova, slika 1.

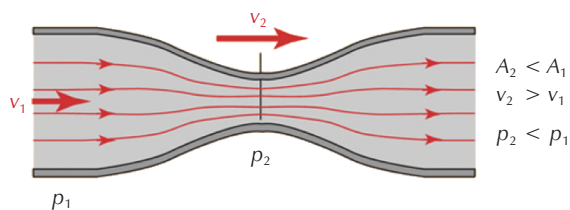


Slika 1 – Strujanje uz krilo slijedi Bernoullijevo načelo

Protok kroz suženje, premda imenovan po drugom istraživaču, Giovanniju Battisti Venturiju (1746. – 1822.), primjenjuje Bernoullijevo načelo u jednom od prvih mjerila protoka – Venturijevoj cijevi. Tako npr. pad tlaka u Venturijevoj cijevi u rasplinjačima motora s unutarnjim sagorijevanjem uvlači benzin u tok zraka koji ulazi u motor. Bernoullijeva relacija za Venturijevu cijev prima oblik, slika 2:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1 + \rho g h_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2 + \rho g h_2.$$

* Prof. dr. sc. Nenad Bolf
e-pošta: bolf@fkit.hr



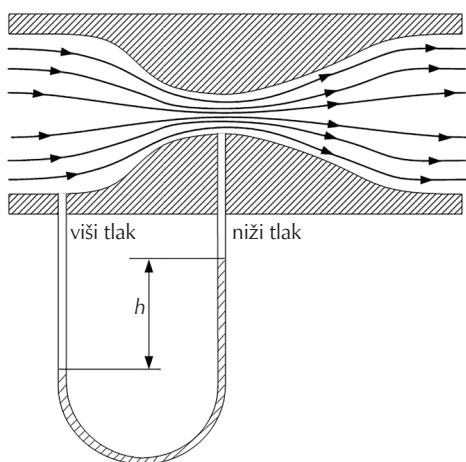
Slika 2 – Suženje Venturijeve cijevi

Razlika tlaka kao mjera protoka

Protok je mjera količine tekućine u kretanju. Tekućina može biti kapljevina ili plin, ali i višefazno strujanje.

Pretvornici protoka računaju protok mjerenjem razlike tlaka između dviju točaka na primarnom elementu ili cijevi u koju je ugrađen. Kako se to radi? Tlak je sila tekućine na određenu površinu. Ta se sila može mjeriti jednostavno pomoću cjevčice koja vodi do mjernog instrumenta. Većina mjerila tlaka zapravo su mjerila razlike tlaka između tlaka u cijevi ili posudi i atmosferskog tlaka.

U-manometar čini cijev u obliku slova U s kapljevnom koja je djelomično ispunjava. Djelovanjem različitih tlakova na vrhu dviju krajeva cijevi kapljevina mijenja visinu (h) koja se očitava na skali, slika 3. Visina kapljevine funkcije je razlike tlaka. Tako se tradicionalno provodilo mjerenje od prvih mjerila protoka.



Slika 3 – Primjena U-manometra za mjerenje protoka iz razlike tlaka

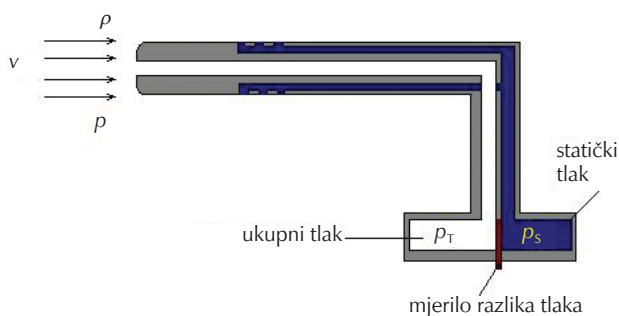
Mjerenje metodom razlike tlaka treba zadovoljiti sljedeće:

1. tekućina treba u potpunosti ispunjavati cijev;
2. gustoća mora biti poznata ili određena na temelju svojstava tekućine, poput plina s promjenjivim tlakom i temperaturom. Promjena gustoće treba se kompenzirati;
3. viskoznost bi trebala biti poznata i konstantna za dane vrijednosti tlaka i temperature, bilo da se pretpostavljaju ili se mjere. Tekućine kojima se viskoznost mijenja s protokom (nenjutnenske) ne treba mjeriti ovom metodom;
4. u trenutku očitavanja protok mora biti stabilan, odnosno u ustaljenom stanju jer se mjerenje temelji na ravnoteži energije u sustavu bez prijelaznih stanja i dinamičkih promjena.

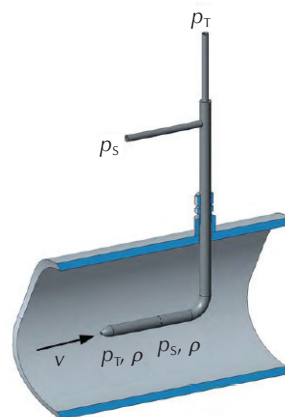
Pitotova cijev

Izravni način mjerenja brzine fluida je primjena Pitotove cijevi. Pitotova cijev mjeri tlak zbog tekućine koja se zaustavlja na fiksnoj točki u toku, što je slično postavljanju ruke kroz otvoreni prozor automobila u vožnji. Pitotova cijev (po francuskom fizičaru Henriju Pitotu, 1695. – 1771.) ili Prandtl-Pitotova cijev (po njemačkom fizičaru Ludwigu Prandtlu) mjeri brzinu toka na temelju razlike tlaka zastoja i statičkoga tlaka koji zbog oblika cijevi nastaju u toku tekućine. To je uska, podulja cijev kojoj se ulazni otvor stavlja u tok tekućine, a drugi kraj spaja na mjerilo tlaka. Plašt cijevi ima na sebi vijenac rupica tako da mjeri statički (p_s) i brzinski tlak ($p_v^2/2$) toka (slika 4). Uz tu cijev stoji i druga, koja je nakon ulaznog otvora savijena okomito prema smjeru strujanja. Čestice tekućine koje u nju ulijeću zbog okomitog se koljena zaustavljaju, tako da se na drugom kraju mjeri tlak zastoja (p_T). Obje cijevi zajedno služe za mjerenje brzine tekućine v prema jednadžbi:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_T - p_s)}{\rho}}$$

Slika 4 – Funkcionalni presjek Pitotove cijevi (<https://hr.wikipedia.org/wiki/Pitot-cijev#/media/Datoteka:Pitot-cijev.jpg>)

Brzina tekućine određuje se ispred cijevi mjerenjem razlike tlaka uz poznatu gustoću, pa je razlika tlaka (diferencijalni tlak) mjera brzine. Ukupni tlak mjeri se na vrhu cijevi, a statički tlak na rupicama izbušenim na površini Pitotova cilindra pod pravim kutom prema protoku.



Slika 5 – Pitotova cijev ugrađena u cjevovodu

Međutim, Pitotova cijev nije uvijek prikladna za industrijska mjerenja jer mjeri tlak u samo jednoj točki ukoliko se ne pomiče poprečno po cijevi. Također strukturno nije dovoljno čvrsta za tok u većim cijevima. Iz tog razloga razvijena je modificirana Pitotova cijev (engl. *averaging Pitot tube*).

Mjerenje razlike tlaka

Svi primarni elementi stvaraju pad tlaka. Ova razlika tlaka proporcionalna je brzini protjecanja, odnosno protoku u cijevi. Izraženo matematički:

$$Q = K_C \sqrt{\Delta p},$$

pri čemu je Q volumni protok, K_C konstanta proporcionalnosti, a Δp je izmjerena razlika tlaka.

K_C se izračunava na temelju geometrije i dizajna primarnog elementa te radnih uvjeta. Mjerilo čine dva elementa prikazana na slici 6.



Slika 6 – Tipičan izgled mjerila razlike tlaka na postrojenju. Primarni element može biti zaslon s otvorom ili Pitotova cijev.

1. Primarni (osjetilni) element ugrađen u cijev uzrokuje pad tlaka i u njemu su ugrađeni priključci za mjerenje razlike tlaka.
2. Sekundarni element (zapravo pretvornik) indikator je razlike tlaka koji daje električni signal proporcionalan protoku proračunom kvadratnog korijena izmjerene razlike tlaka. Pretvornik može mjeriti još i statički tlak i temperaturu tekućine u cijevi na temelju čega se protok može kompenzirati (normalizirati) na maseni protok.

Mjerenje protoka iz razlike tlaka najbolje funkcionira s čistim, homogenim tekućinama iako se neki primarni elementi mogu primijeniti s prljavim ili tekućinama koje sadrže krute čestice. Osnovne smjernice za primjenu su:

1. odabrati odgovarajući primarni element prema mediju koji protječe;
2. ugraditi i provjeriti rad mjerila protoka;
3. održavati mjerilo tako da na primarnom elementu nema opstrukcija niti oštećenja mjernog elementa.;
4. provjeriti radi li pretvornik razlike tlaka u skladu sa specifikacijama.

Primarni (osjetilni) element

Postoji nekoliko vrsta primarnih elemenata za mjerenje razlike tlaka:

- mjerni zaslon (prigušnica) i zaslon s više otvora (*orifice plate & multi-hole orifice plate*),
- Pitotova cijev (*averaging Pitot tube*),
- Venturijeva cijev (*Venturi tube*),
- klinasto mjerilo (*wedge meter*),

- konusno mjerilo (*cone meter*),
- mlaznica (*flow nozzle*).

Svi djeluju na istom načelu mjerenja razlike tlaka. Prednost im je da je lako naći odgovarajući primarni element za svaku primjenu, a izazov je odabrati odgovarajući.

Sekundarni element (mjerni pretvornik)

Sekundarni element očitava razliku tlaka koja nastaje na primarnom elementu. Postoje jednostavni indikatori na kojima se signal očitava na skali, ali najčešće se rabi pretvornik razlike tlaka. Pretvornik je izveden tako da pretvara mehanički tlak u analogni ili digitalni signal i šalje ga u sustav za vođenje. Projektiraju se i izrađuju za precizno mjerenje na širokom radnom području. Na slici 7 prikazan je primjer jednostavnog pretvornika. Viševeličinski pretvornici dodatno mjere statički tlak i temperaturu. Ako je potrebno izraziti maseni protok, navedena mjerenja služe za kompenzaciju promjena gustoće, stanja tekućine i drugih parametara protjecanja.



Slika 7 – Pretvornik razlike tlaka

Iako je viševeličinski pretvornik skuplji od standardnog, njegovom primjenom više nije potrebno instalirati zasebne uređaje što znači manje pretvornika, ožičenja, procesnih spojeva i manji trošak instalacije. Viševeličinski pretvornici također mogu računati i energetski tok.

O praktičnim aspektima mjerenja protoka pisat ćemo u jednom od sljedećih izdanja časopisa.

Literatura

- URL: https://hr.wikipedia.org/wiki/Bernoullijeva_jednad%C5%BEba (10. 6. 2020.).
- The Engineering's Guide to DP Flow Measurement, 2020 Edition, Emerson Automation Solutions.
- Bernoullijeva jednadžba, URL: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=7186>, "Hrvatska enciklopedija", Leksikografski zavod Miroslav Krleža, www.enciklopedija.hr, 2015.
- Venturijeva cijev, URL: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=64287>, "Hrvatska enciklopedija", Leksikografski zavod Miroslav Krleža, www.enciklopedija.hr, 2016.
- Rasplinjač, URL: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=51870>, "Hrvatska enciklopedija", Leksikografski zavod Miroslav Krleža, www.enciklopedija.hr, 2016.
- URL: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Pitot-cijev> (10. 6. 2020.).
- Seminar AVP-4, Procesna mjerenja, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, Laboratorij za automatiku i mjerenja, 2017.