

MJERNA I REGULACIJSKA TEHNIKA



Uređuje: Nenad Bolf

U ovoj rubrici razmatrat ćemo najnovija dostignuća u mjernoj i regulacijskoj tehnici, ali i prikazati i podsjetiti na osnovna načela rada mjernih pretvornika i regulatora. Svakodnevno se u našim radnim zadacima od laboratorija do velikih postrojenja susrećemo s mjernom i regulacijskom opremom. Vrlo se često pri odabiru i nabavi opreme ne razmatraju sve značajke bitne za pouzdan i kvalitetan rad procesa i postrojenja. Također ne primjenjujemo sve mogućnosti koje suvremena mjerna i regulacijska tehnika nudi. Stoga ćemo u rubrici analizirati mjerna načela, predstavljati nove mjerne uređaje i tehnike te pokazati kako se nadgledanjem, dijagnostikom, statističkom analizom te ugađanjem i optimiranjem sustava za vođenje mogu ostvariti visoka kvaliteta proizvoda, siguran rad i ušteda energije.

Mjerenje malih protoka u laboratoriju i na postrojenju

|| N. Bolf*

Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije
Sveučilišta u Zagrebu
Savska cesta 16/5A, 10 000 Zagreb

Mjerenje protoka u laboratorijima i pilot-postrojenjima bitno se razlikuje od mjerenja protoka u standardnim industrijskim uvjetima, stoga donosi karakteristične probleme. Što je protok manji, manje je energije dostupno za pretvorbu u mehaničku energiju za mjerne svrhe. Tekućine često struje u laminarnim uvjetima, a utjecaji viskoznosti i graničnog sloja postaju dominantni. Komponente samog osjetila protoka također su minijature. Općenito govoreći, što je mjerilo protoka manje, teže je mjeriti točno. Također većina mjerila protoka mjere brzinu strujanja i volumni protok, ali postoje i mjerila koja mjere maseni protok koji se ne mijenja s promjenom temperature i tlaka.^{1,2}

Protok kroz cijev karakterizira *Reynoldsov broj (Re)*, bezdimenzijska matematička značajka koja uzima u obzir gustoću, viskoznost, brzinu, tlak i radne parametre. Većina standardnih mjerila protoka zahtijeva turbulentno strujanje i veće Reynoldsove brojeve, dok se pri malim protocima često nalazimo u laminarnim uvjetima protjecanja.

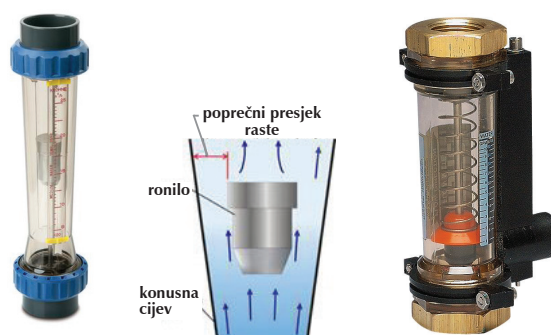
Razmotrimo koje su nam metode mjerenja na raspolaganju za male protoke, odnosno za cijevi malih promjera. Pri odabiru mjernih pretvornika u obzir treba uzeti radno područje na kojem će se mijenjati protok, minimalni protok koji mjerilo može mjeriti, ponovljivost, linearnost i cijenu.

Rotametri (engl. *rotameter*)

Vjerojatno najstarije i danas, još uvijek, najčešće mjerilo protoka je *rotametar* ili mjerilo s promjenjivom površinom (engl. *variable area flowmeter*). Radi se zapravo o jednostavnoj plastičnoj ili staklenoj, vertikalno postavljenoj konusnoj cijevi s kuglicom ili pažljivo oblikovanim ronilom/plovkom, slika 1. Poprečna površina cijevi mijenja se s visinom. Kuglica ili plovak mijenja svoj položaj unutar konusne cijevi shodno promjeni protoka, a protok se očitava na umjerenoj ljestvici obično ugraviranoj na cijevi.

Rotametri su prikladni i za visoke i niske Reynoldsove brojeve. Promjena viskoznosti i gustoće tekućine utječe na točnost mjerenja, stoga ova mjerila treba umjeravati i upotrebljavati pri definiranim radnim uvjetima. I manje promjene radnih uvjeta imaju kao posljedicu nesrazmjernu promjenu u očitavanju.

Ta mjerila u pravilu nemaju izlazni električni signal. Prema potrebi, primjenom magnetskih sljedila (engl. *magnetic followers*) ostvaruje se električni signal. Tada je moguće mjeriti i protok neprozirnih tekućina. Neka od ovih mjerila imaju ugrađenu oprugu unutar cijevi koja se opire protjecanju pa se takva osjetila mogu postaviti i u drugi položaj osim okomitog, a mogu se ugraditi i u visokotlačne linije.



Slika 1 – Rotametri se u pravilu ugrađuju okomito^{3,4}

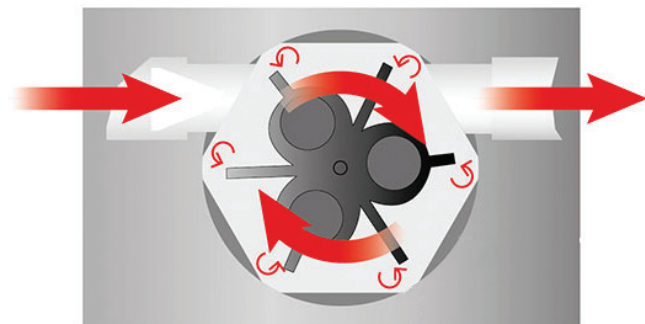
Turbinska mjerila protoka (engl. *turbine flowmeter*)

Uobičajena mjerila protoka s aksijalno ugrađenim turbinama ("propeler u cijevi") nisu prikladna za male protoke jer su namijenjena za turbulentno strujanje. Mjerila s malim aksijalnim tur-

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

binama također su osjetljiva na promjene radnih uvjeta, posebno na viskoznost i promjenu temperature.

Za razliku od aksijalnih, radijalne turbine (koje se često nazivaju *Peltonovim turbinama*) manje su podložne promjenama radnih uvjeta i dizajnirane su tako da mogu mjeriti na granici laminarnog i turbulentnog strujanja. Rade na sličnom načelu kao i tradicionalne vodenice. Većina mjerila protoka vode u domaćinstvima rade na taj način. Mjerila protoka s radijalnim turbinama, slika 2, najčešće imaju turbine s laganim plosnatim lopaticama ugrađenim na klizni ležaj, slično kako je to izvedeno na velikim satnim mehanizmima. Mlaz tekućine udara na površinu lopatice i uzrokuje rotaciju turbine.



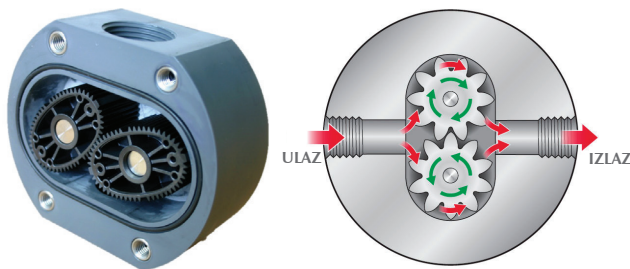
Slika 2 – Turbinsko mjerilo protoka Peltonovog tipa⁵

Pad tlaka na ovom mjerilu može biti velik. Radijalne turbine su osjetljive na promjenu viskoznosti kapljevine. Za mjerenje najmanjih protoka primjenjuju se mjerila s vrlo malim trenjem na osovini turbine, no rijetko imaju dugi radni vijek.

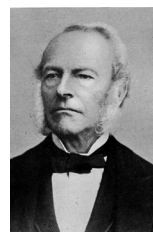
Potisna mjerila protoka (engl. *positive displacement flowmeter*)

Postoji mnogo različitih vrsta potisnih mjerila i općenito su prikladna za cijevi malih dimenzija i za male protoke uz uvjet da je kapljevine dovoljno tečljiva i viskozna. Zupčasti rotor ovalnog oblika rotira unutar posebno oblikovane komore. Okretanjem rotor zahvaća i istiskuje određeni volumen kapljevine, a volumni protok se mjeri brojeći koliko je volumena istisnuto (obično primjenom *Hallovega efekta*), slika 3.

Ta mjerila obično nisu prikladna za vodu, otapala i vodene otopine zbog male viskoznosti i slabih mazivih svojstva. Problem predstavljaju i krute čestice koje se ponekad nalaze u kapljevine. Većine ulja, maziva, sirupa i sl. prikladna su za taj način mjerenja budući da su im svojstva prikladna za takva mjerila protoka.



Slika 3 – Potisna mjerila protoka za kapljevine velike viskoznosti⁶



George Gabriel Stokes



Osborne Reynolds

Što je Reynoldsov broj (značajka)?

- Bezdimenzijski broj kojime definiramo način strujanja (laminarno, turbulento ili prijelazno), odnosno predviđamo kako će tekućina protjecati pod različitim uvjetima;
- Uveo ju je fizičar *George Gabriel Stokes* (1819. – 1903.) sredinom XIX. stoljeća, a ime je dobila po istraživaču dinamike fluida *Osborneu Reynoldsu* (1842. – 1912.) koji ju je raširio i popularizirao do kraja XIX. stoljeća.

Kako se određuje?

- Reynoldsov broj definiran je omjerom inercijske sile koja uzrokuje gibanje i viskoznih sila. Određivanjem Re za uvjete u kojima protječe tekućina možemo teorijski predvidjeti njezino vladanje:

$$Re = \frac{F_{iner}}{F_{vis}} = \frac{m \cdot a}{\tau \cdot S} = \frac{\rho \cdot l^3 \cdot \frac{v^2}{l}}{\mu \cdot \frac{v}{l} \cdot l^2} = \frac{\rho \cdot l \cdot v}{\mu} = \frac{l \cdot v}{\nu} \quad Re_{cijev} = \frac{Q \cdot d}{v \cdot A}$$

F_{iner} – inercijska sila, F_{vis} – viskozne sile, ρ – gustoća tekućine, v – brzina tekućine, μ – dinamička viskoznost, ν – kinematička viskoznost, l – veličina koja definira geometriju promatranog sustava, m – masa, a – akceleracija, τ – smično naprežanje, S – površina kvašenja, Q – volumni protok, d – promjer cijevi, A – poprečni presjek cijevi.

Karakteristike strujanja u cijevi

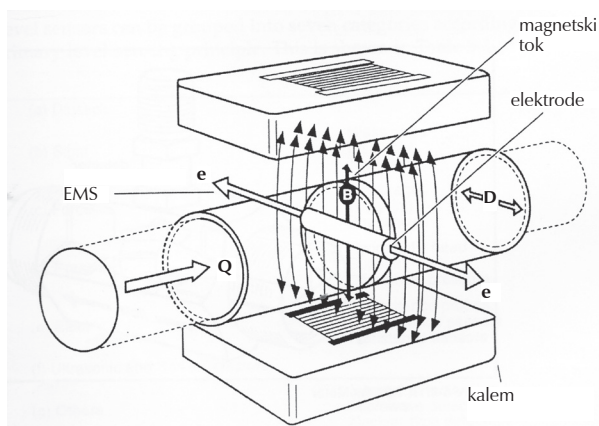
- Granice između laminarnog i turbulenta strujanja ovise o geometriji. Za približno $Re < 2100$ dominiraju viskozne sile i strujanje će biti laminarno s paralelnim strujnicama pa se očekuje pravilno predvidljivo strujanje.
- Na području $2100 < Re < 4000$ nastupa prijelazno područje u kojem se miješaju laminarno i turbulento strujanje.
- Za $Re > 4000$ dominiraju inercijske sile i strujanje će biti turbulento. Pojavljuju se spiralni vrtlozi zbog turbulencija koje stvaraju inercijalne sile. Takvo strujanje je prilično nepredvidljivo i fluktuirajuće, a njime se djelotvorno mogu miješati dvije ili više tekućina.

Elektromagnetska mjerila protoka (engl. *electromagnetic flowmeter*)

Elektromagnetska mjerila protoka slijede *Faradayev zakon elektromagnetske indukcije*, koji kaže da vodič koji se giba u magnetskom polju stvara elektromotornu silu (EMS) pod pravim kutom na magnetsko polje. Amplituda EMS-a proporcionalna je brzini gibanja vodiča.

U ovom slučaju vodič je tekućina koja protječe kroz mjerilo, pa je ovo mjerilo ograničeno na tekućine koje vode električnu struju. Suвременa mjerila ovog tipa mogu mjeriti protok kapljevine s vrlo malom vodljivosti.

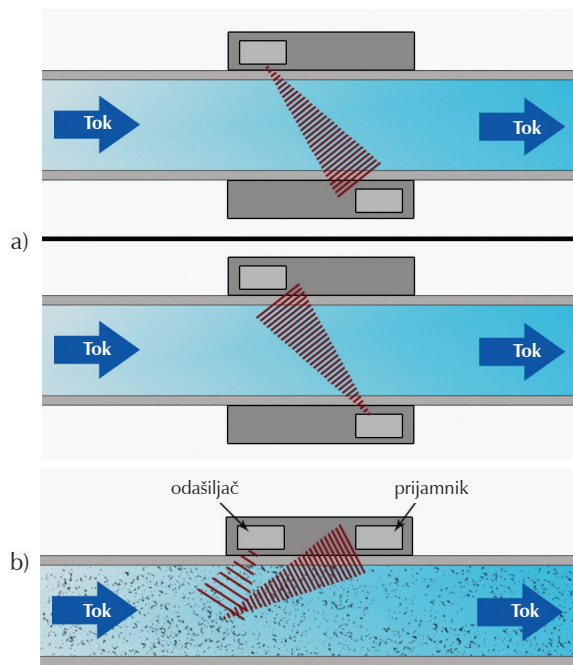
Praktična izvedba prikazana je na slici 4. Promjenjivo magnetsko polje stvaraju magneti na suprotnim stranama cijevi. Na centralnoj liniji između dva generatora polja nalaze se elektrode. Protokom tekućine kroz promjenjivo magnetsko polje inducira se izmjenični napon na elektrodama koji je proporcionalan brzini protjecanja tekućine kroz cijev. Takva mjerila novije proizvodnje mogu mjeriti i protoke u cijevima promjera sve do 3 mm. Najmanje mjerljive brzine protoka su oko $0,3 \text{ m s}^{-1}$, odnosno oko $0,2 \text{ l min}^{-1}$.



Slika 4 – Presjek elektromagnetskog mjerila protoka⁷

Ultrazvučna mjerila protoka (engl. *ultrasonic flowmeter*)

Mjerila koja su posljednje razvijena, a danas se široko primjenjuju temelje se na ultrazvučnoj tehnologiji. S njima je moguće mjeriti protoke sve do približno $0,25 \text{ ml min}^{-1}$. Putem odašiljača ultrazvuk se odašilje u smjeru protoka tekućine, dok prijemnik prima signal nizvodno. Drugi senzor zatim šalje signal nazad protustrujno do prvog senzora, slika 5.



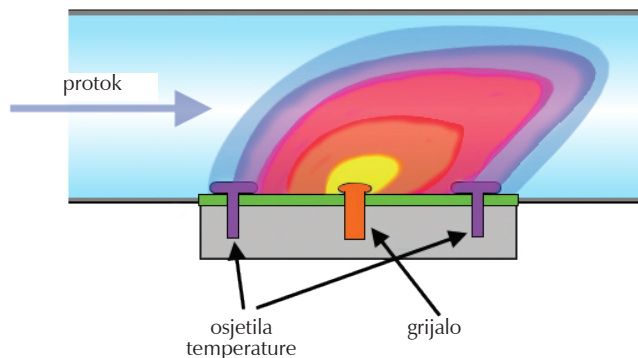
Slika 5 – Ultrazvučna mjerila protoka: a) transit-time b) Doppler^{8,9}

Kako je jedan puls ubrzan brzinom tekućine, a drugi je usporen, razlika u vremenu putovanja (engl. *time of flight*) dvostruko je veća od brzine fluida. Budući da je promjer mjerne cijevi poznat, jednostavno se izračunava volumni protok.

Na ultrazvučnom području slično mjere i Dopplerova mjerila protoka kod kojih postoje dva osjetila ugrađena ili omotana na vanjskoj strani cijevi. Jedno od osjetila je pretvornik koji odašilja ultrazvučni signal u cijev. Taj signal se reflektira od krutih čestica ili mjehurića plinova u tekućini. Mjeri se razlika u frekvenciji između odašlanog i primljenog signala i pretvara u volumni protok.

Toplinska mjerila protoka (engl. *thermal flowmeter*)

Svjesni ograničenja do sada navedenih metoda mjerenja inženjeri koji se bave projektiranjem mjerila protoka shvatili su da je jedini način da se točno mjere vrlo mali protoci unijeti malu količinu energije tako da se ne poremeti protok. Toplinska mjerila unose energiju u sustav i u stanju su mjeriti iznimno male protoke sve do $\mu\text{l min}^{-1}$. Minijaturni toplinski element unosi toplinu u fluid, a disipacija ove energije mjeri se i preračunava u maseni protok. Takvi elementi mogu imati problema s točnošću te se zato upotrebljava metoda s tri elementa. Jedan od elemenata mjeri referentnu temperaturu. Drugi element je izvor topline, a treći mjeri disipaciju topline koja se zatim preračunava u protok, slika 6.



Slika 6 – Toplinsko mjerilo malih protoka¹⁰

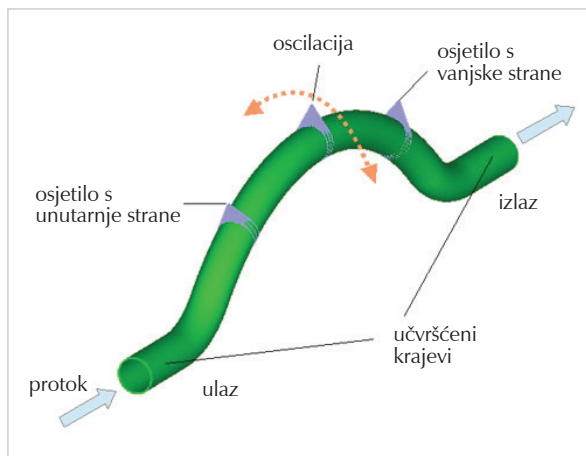
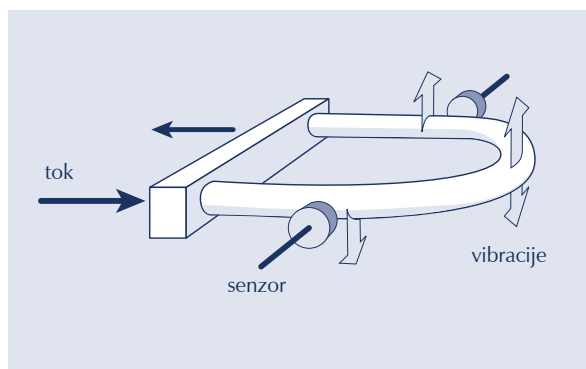
Ta mjerila mjere maseni protok i mogu mjeriti iznimno male protoke plinova. Za točnost mjerenja važno je poznavati toplinske karakteristike plina (specifični toplinski kapacitet), što znači da se uređaj treba umjeravati posebno za svaki plin.

Coriolisova mjerila protoka (engl. *Coriolis flowmeter*)

Godine 1835. francuski je matematičar *Gaspard Gustave Coriolis* (1792. – 1843.) ustanovio da se ravnocrtno gibajući objekt prividno otklanja od ravne linije kad se gleda iz rotirajućeg sustava. 1970-ih je "Coriolisov efekt"⁷ (http://en.wikipedia.org/wiki/Coriolis_effect) našao primjenu za mjerenje masenog protoka: tekućina koja se giba u zakrivljenoj cijevi zbog promjene kutne brzine izazvat će uvijanje cijevi. Praktičnu izvedbu obično čine dvije zavijene mjerne cijevi pobudene da osciliraju u elektromagnetskom polju. Kad nema protoka dvije cijevi osciliraju simetrično. Kad protječe tekućina cijevi se deformiraju, a deformacije mjere dva senzora koja registriraju fazni pomak koji je proporcionalan masenom protoku.

Tablica 1 – Karakteristike mjerila malih protoka te njihove pozitivne (+) i negativne (–) strane

	Radno područje	Minimalni protok	Linearnost	Ponovljivost	Cijena
Rotametar	--	--	--	--	++
Turbinska/Pelton	+ –	+ –	+ –	+ –	++
Potisna	+ –	++	++	+ –	+ –
Elektromagnetska	+ –	+ –	++	+ –	–
Ultrazvučna	++	++	+ –	+	+
Toplinska	++	++	--	+	+ –
Coriolisova	+	+	++	++	–

Slika 7 – Shematski prikaz Coriolisova mjerila protoka^{11,12}

Dok većina mjerila mjere brzinu, volumen ili razliku tlakova, Coriolisova mjerila mjere izravno maseni protok. Iz frekvencije oscilacija cijevi ujedno mjere i gustoću tekućine koja protječe kroz cijev. Ta su mjerila vrlo osjetljiva i mogu mjeriti vrlo male masene protoke (do $0,4 \text{ g min}^{-1}$) uz veliku točnost i linearnost (do $\pm 0,1 \%$) te brzi odziv bez obzira radi li se o plinu ili kapljevinu. Točnost zadržavaju i pri promjeni tlaka, temperature, gustoće, vodljivosti i viskoznosti. Cijena im je, još uvijek, prilično visoka, ali je njihova primjena u velikom porastu.

Zaključak

Pri odabiru prikladnog mjerila malih protoka za cijevi malih promjera postoji nekoliko mogućnosti za svako područje protoka. Nove generacije ultrazvučnih mjerila mogu raditi na širokom području, no kad je potrebno mjeriti ekstremno male protoke, toplinska osjetila su jedina mogućnost. Rotametri su zadovoljavajući još samo kao lokalni indikatori. Turbinska mjerila Peltonova tipa imaju najbolji omjer cijene i karakteristika koje nude. Ako je bitna točnost, prikladna su Coriolisova mjerila koja su najskuplja. Konačni odabir u pravilu je kompromis između karakteristika, cijene i radnih parametara, kako je to prikazano u tablici 1.

Literatura

1. N. Bolf, AVP-4 Procesna mjerenja, Seminari za inženjere, operatore i specijaliste, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, 2014.
2. N. Bolf, Mjerenje protoka, Predavanja iz kolegija Mjerenja i vođenje procesa, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, 2014.
3. http://krohne.com/typo3temp/pics/K20_800x800_4a3fed8019.jpg (2. 1. 2015.)
4. http://static.coleparmer.com/large_images/3221156.jpg (2. 1. 2015.)
5. T. Forster, Flow Measurement in the Laboratory, Titan Enterprises Ltd.
6. http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/positive-displacement-flow-meter-14004-3989745.jpg (2. 1. 2015.)
7. P. W. Murill, Fundamentals of Process Control Theory, 3rd Edition, ISA, 2000.
8. <http://www.flujamanos.com/wpinstall/wp-content/uploads/2012/05/time-of-flight-flow-meter.gif> (2. 1. 2015.)
9. <http://www.instreng.com/wp-content/uploads/2014/04/doppler-flow-meter.gif> (2. 1. 2015.)
10. [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/53/Thermal_mass_flow_meter\(constant_temperature_differential\).png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/53/Thermal_mass_flow_meter(constant_temperature_differential).png) (2. 1. 2015.)
11. http://www.bronkhorst.com/files/br_coritech/downloads/brochures-en/mini_coriflow.pdf (2. 1. 2015.)
12. http://www.adina.com/cor_fig1.jpg (2. 1. 2015.)