

Vježba F-10: MJERENJE PROTOKA

1. Svrha vježbe

Upoznati metode i načela mjerenja protoka. Upoznati se s regulacijskim i elektromagnetskim ventilima. Usporediti karakteristike različitih mjernih pretvornika protoka i odrediti karakteristiku regulacijskog ventila.

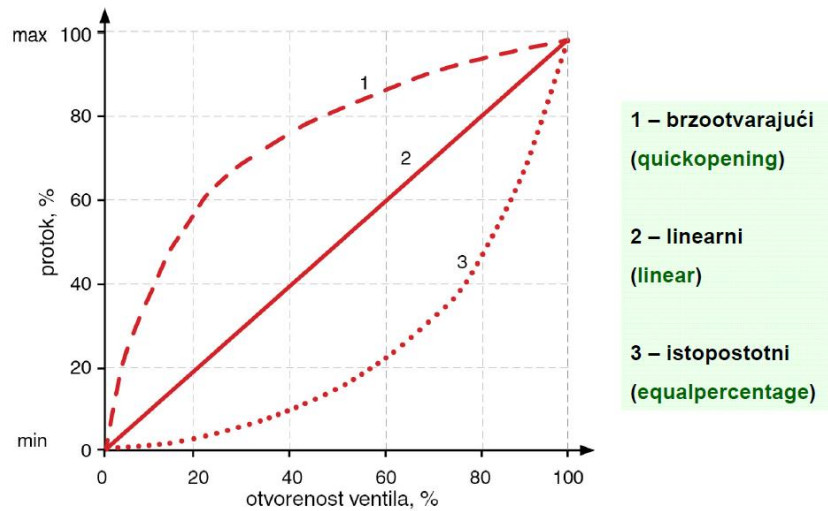
2. Teorijske osnove

Za mjerenje protoka uobičajeno se upotrebljavaju tlačna, mehanička, toplinska i druga mjerna načela. Mjerni pretvornici protoka mjere volumni ili maseni protok. Neki pretvornici mjere brzinu protjecanja, a neki razliku tlakova iz koje se računa protok. U ovoj vježbi protok se mjeri primjenom mjernog zaslona, rotametra, magnetskog, vrtložnog, Coriolisovog i ultrazvučnog mjernog pretvornika protoka.

Ventili služe za regulaciju protoka, a u osnovi se dijele na elektromagnetske i regulacijske ventile. Elektromagnetski ventili služe za otvaranje, preusmjerenje ili zaustavljanje toka, dok regulacijski ventili služe podešavanje protoka. U većini primjena u kemijskom inženjerstvu regulacijski ventili predstavljaju izvršne elemente u regulacijskom krugu, stoga ih je potrebno pažljivo dimenzionirati i odabrati. S obzirom na odnos između otvorenosti ventila (pomaka osovine) i ostvarenog protoka, dijele se u tri skupine:

1. *Brzootvarajući ventili (s padajućom osjetljivošću)*
Osjetljivost ventila, odnosno promjena protoka s obzirom na promjenu otvorenosti ventila, opada s povećanjem otvorenosti ventila.
2. *Ventili s linearnom karakteristikom*
Osjetljivost ventila približno je stalna na cijelom radnom području protoka.
3. *Ventili s istopostotnom karakteristikom (s rastućom osjetljivošću)*
Osjetljivost ventila je stalni postotak danog protoka i raste s povećanjem otvorenosti ventila.

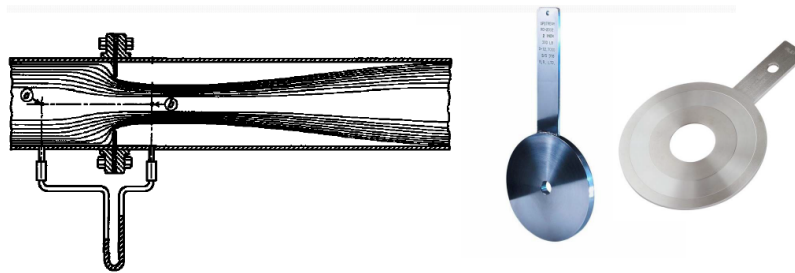
Na slici 1 prikazana je ovisnost protoka o otvorenosti ventila za navedene skupine.



Slika 1 Inherentna karakteristika ventila

2.1 Mjerni zaslon

Mjerni zaslon spada u grupu mjernih pretvornika protoka čije se djelovanje temelji na mjerenju razlike tlaka. U cijev kroz koju protječe tekućina uvodi se suženje (prigušnica) što dovodi do pada tlaka. Pretvornikom razlike tlakova (diferencijalnog tlaka) mjeri se razlika tlaka prije i poslije zaslona. Pad tlaka mijenja se u ovisnosti o protoku odnosno protok se može izračunati iz izmjerenog pada tlaka na zaslonu, kako slijedi iz Bernuolijeve jednadžbe. Na slici 2 prikazan je mjerni zaslon a jednadžbama 1 i 2 dane su relacije za izračun protoka.



Slika 2 Mjerni zaslon

pri čemu su:

$$v = \frac{C_o}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{\frac{2(p_1-p_2)}{\rho}} \quad (1)$$

$$q = vS_o \quad (2)$$

v – brzina tekućine [m s^{-1}]
 C_o – koeficijent odstupanja (0,61 za $\text{Re} > 30.000$)
 β – omjer promjera zaslona i cijevi
 p_1 – tlak prije zaslona [Pa]
 p_2 – tlak poslije zaslona [Pa]
 ρ – gustoća tekućine
 q – protok [m^3s^{-1}]
 S_o – poprečna površina otvora zaslona [m^2]

2.2 Rotametar

Rotametar, prikazan slikom 3, izveden je u obliku konusne cijevi u kojoj se nalazi metalno ili stakleno lebdilo/ronilo kojeg pomiče sila tekućine. Pomak ronila proporcionalna je volumnom protoku, a površina presjeka cijevi se unutar rotametra povećava kako bi se održao stalni pad tlaka.

Protok se očitava na graviranoj skali. Postoje rotametri s izravnim očitavanjem u inženjerskim jedinicama i korelacijski rotametri kod kojih na skali nisu naznačene jedinice. Kod rotametra s izravnim očitavanjem promjena uvjeta mjerenja (temperature i tlaka) utječe na točnost mjerenja, dok se korelacijski rotametri mogu primijeniti pri različitim procesnim uvjetima i za različite tekućine uz preračunavanje očitanih vrijednosti u odgovarajuće inženjerske jedinice.

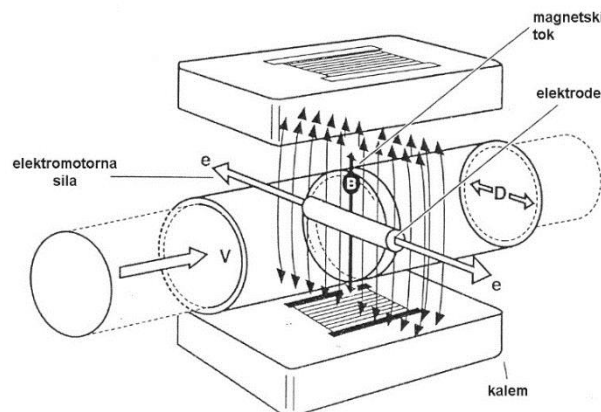


Slika 3 Različite izvedbe rotametra i prikaz strujanja u rotametri

2.3 Magnetsko mjerilo protoka

Načelo rada magnetskog mjerila protoka, slika 3, slijedi iz Faradayevog zakona elektromagnetske indukcije koji kaže da je napon stvoren u zatvorenom krugu direktno proporcionalan gustoći magnetskog toka koji presijeca taj krug pod pravim kutom.

U toj izvedbi magneti smješteni iznad i ispod cijevi stvaraju magnetski tok, B , kako je to prikazano na slici 3. Zbog kretanja vodljive tekućine pod pravim kutom prema tom magnetskom toku inducira se potencijal (EMS). Stvoreni napon između elektroda je direktno proporcionalan protoku tekućine kroz cijev.



Slika 3 Magnetsko mjerilo protoka

Za ovu izvedbu primjenjujemo Faradayev zakon u obliku prikazanom jednadžbom 3:

$$E = k \cdot B \cdot d \cdot v \quad (3)$$

pri čemu su:

E – inducirani napon (elektromotorna sila) između elektroda [V]

k – konstanta proporcionalnosti

B – gustoća magnetskog toka [Tesla = $\text{kg s}^{-2} \text{A}^{-1}$]

d – udaljenost između elektroda [m]

v – brzina tekućine [m s^{-1}]

2.4 Vrtložno mjerilo protoka

Vrtložno mjerilo protoka, slika 4 temelji se na stvaranju periodičnih kovitlajućih vrtloga iza široke ravne prepreke. Frekvencija vrtloženja izravno je proporcionalna protoku:

$$f = \frac{Sv}{L} \quad (4)$$

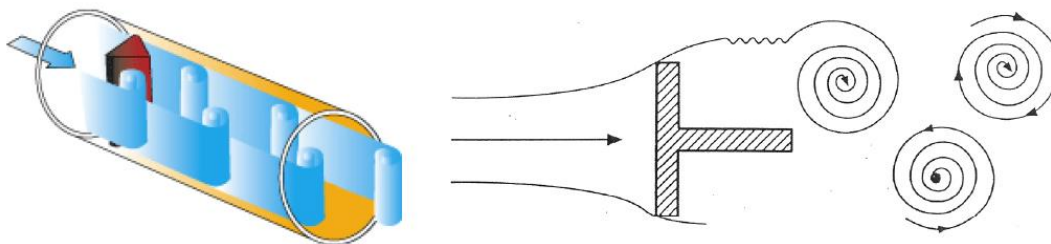
pri čemu su:

f – frekvencija vrtloženja [Hz]

S – Strouhal-ov broj (opisuje oscilaciju toka, konstantan za određeni oblik tijela)

v – brzina protoka preko zaslona [m s^{-1}]

L – karakteristična duljina zaslona [m]

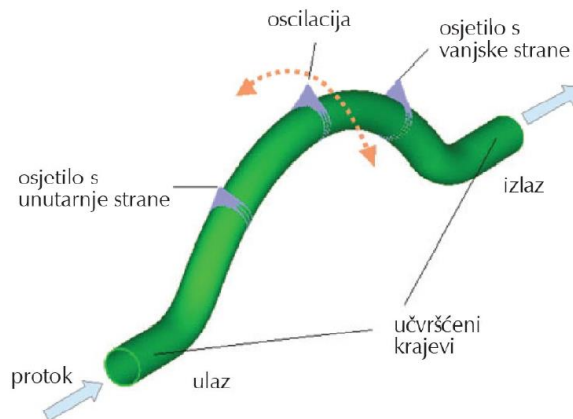


Slika 4 Vrtložno mjerilo protoka

Preduvjet za rad vrtložnih mjerila protoka je dobro razvijeni vrtložni režim protjecanja. To ovisi o Reynoldsovoj bezdimenzijskoj značajki. Iako se vrtlozi stvaraju već pri vrijednostima Re-broja od 2.000, za pouzdano mjerenje potreban je $Re > 10.000$.

2.5 Coriolisovo mjerilo protoka

Coriolisov pretvornik, pojednostavljeno prikazan slikom 5, sastoji se od zakrivljene cijevi kroz koju protječe kapljevina. Na sredini cijevi nalazi se elektro-magnetska zavojnica koja izaziva osciliranje cijevi. Uz ulazni i izlazni dio cijevi nalaze se senzori pomaka koji registriraju oscilacije.



Slika 5 Coriolisovo mjerilo protoka

Kada kroz cijev ne protječe kapljevina oscilacije ulaznog i izlaznog kraja cijevi su iste (u fazi su!). Međutim, kada kroz cijev krene tok Coriolisova sila uzrokuje da ulazna i izlazna strana cijevi osciliraju u suprotnim smjerovima. Senzori pomaka visoke osjetljivosti registriraju tu promjenu kao funkciju vremena i prostora, odnosno faznog pomaka. Fazni pomak direktno je ovisan o masi tekućine koja protječe kroz mjerilo. Što je protok veći raste i fazni pomak. Osim mjerenja faznog pomaka, senzori mjere i frekvenciju osciliranja na temelju koje se mjeri gustoća tekućine što protječe kroz cijev.

2.6 Ultrazvučno mjerilo protoka

Ultrazvučna mjerila protoka, slika 6, dijele se na Dopplerova i mjerila vremena prijelaza. Dopplerova mjerila mjere pomak frekvencije zbog protoka tekućine, a pomak frekvencije proporcionalan je brzini tekućine. Mjerila vremena prijelaza imaju dva pretvornika ugrađena na suprotnim stranama cijevi a mjeri se vremenska razlika koja je proporcionalna protoku.

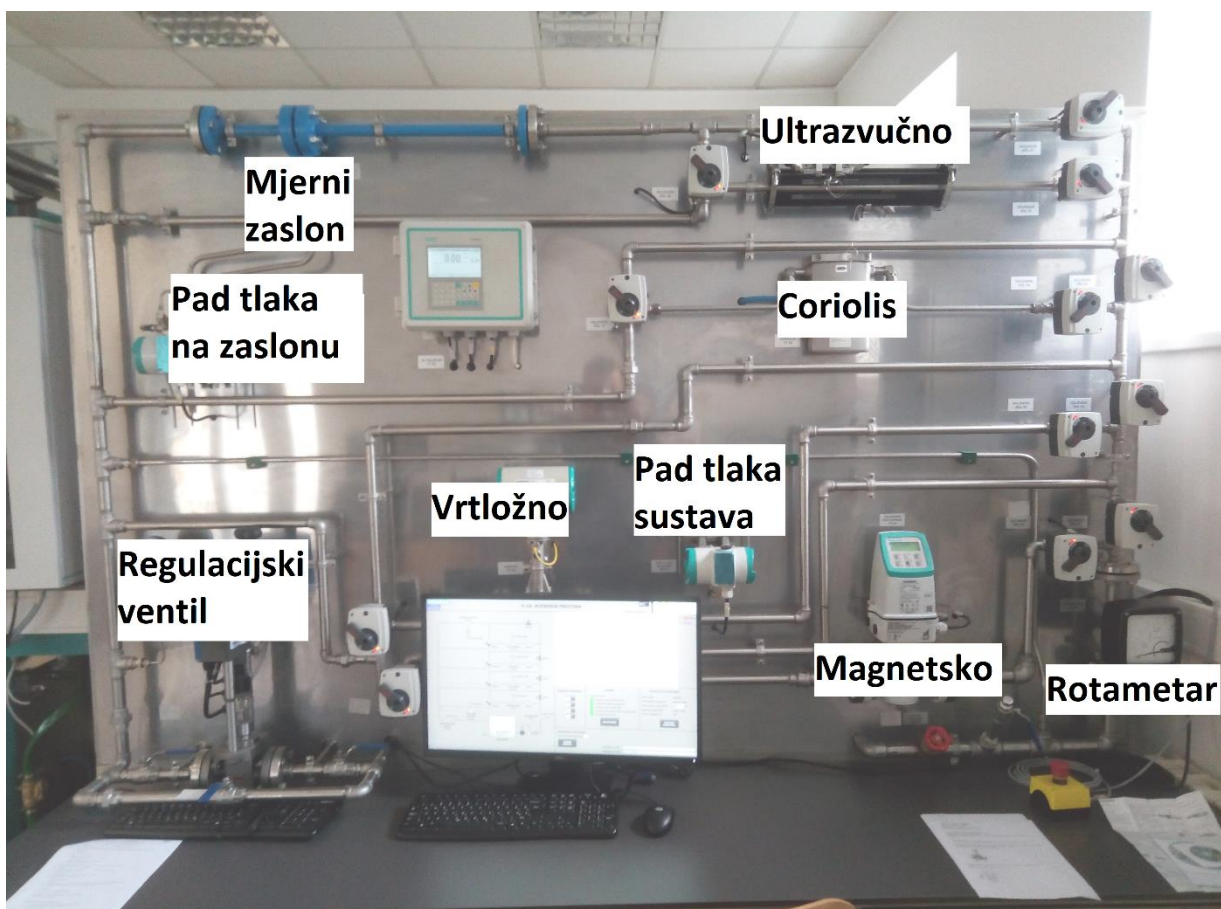


Slika 6 Ultrazvučno mjerilo protoka

Ultrazvučna mjerila protoka se jednostavno učvrste na cijev. Zbog toga su prenosiva i često se primjenjuju za povremeno mjerenje protoka na cijevima na kojima nisu ugrađena mjerila.

OPIS VJEŽBE I MJERENJA

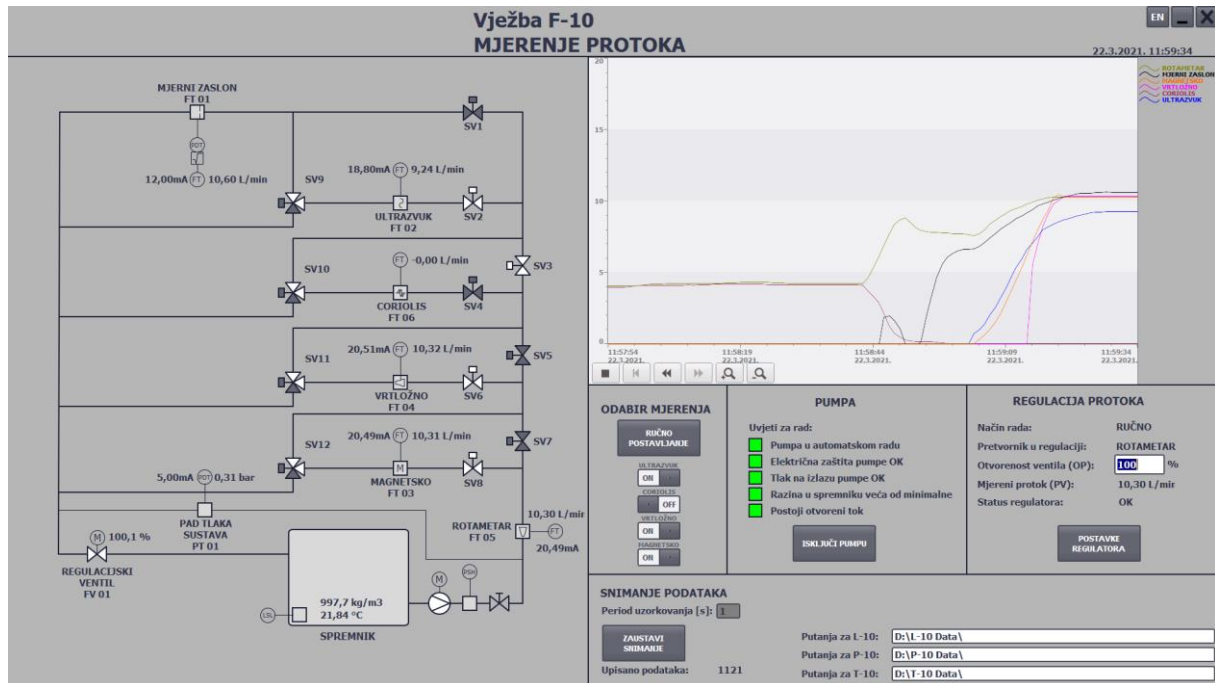
Laboratorijski postav vježbe sastoji se od pumpe, cjevovoda, različitih pretvornika protoka, mjerila pada tlaka u sustavu cjevovoda, regulacijskog ventila i elektromagnetskih ventila. Voda se dobavlja iz spremnika. Mjerni sustav povezan je sa sustavom za vođenje i računalom pomoću kojeg se upravlja procesom i spremaju podaci. Mjerni sustav prikazan je na slici 7.



Slika 7 Sustav za mjerenje i regulaciju protoka

Pumpa tjera vodu kroz sustav, a na računalom sučelju moguće je odabrati pretvornike koji će biti u funkciji, slika 8. Svi pretvornici serijski su spojeni odnosno protok kroz njih je isti. Elektromagnetskim ventilima preusmjerava se protok na odgovarajuće mjerene pretvornike.

Tijekom provedbe vježbe mijenja se otvorenost regulacijskog ventila, a prati se odziv mjernih pretvornika. Svi podaci spremaju se u datoteku i preuzimaju na USB memoriju po završetku vježbe za daljnju obradu.



Slika 8 Računalno sučelje

POKUSI

- Pripremite se za rad na vježbi tako da pročitate upute za pokretanje vježbe
- U prozoru „ODABIR MJERENJA“ isključite Coriolisovo mjerilo (OFF), a uključite ostala tri mjerila (ON).
- Pokrenite snimanje podataka klikom na polje „POKRENITE SNIMANJE“
- Mijenjajte otvorenost ventila upisom postotka otvorenosti na sučelju „Otvorenost ventila (OP)“ i potvrdom s *Enter*. Između svake promjene otvorenosti ventila pričekajte jednu minutu kako bi se protok stabilizirao. Otvorenost ventila mijenjajte prema redoslijedu: 100, 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20, 10, 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100. Ponovite postupak tri puta.
- Nakon što završite prvi dio mjerenja izvedite skokomičnu promjenu protoka otvaranjem ventila sa 40 na 100 posto. Iz grafičkih prikaza odziva procijenite vremenske konstante pojedinih mjernih pretvornika!
- Isključite pumpu klikom na polje „ISKLJUČI PUMPU“ i zaustavite snimanje klikom na polje „ZAUSTAVI SNIMANJE“. Pohranite datoteku na USB.

OBRADA REZULTATA I IZVJEŠTAJ

Datoteku učitajte u tablični kalkulator (npr. *Excel* ili *Matlab*). Mjerne rezultate prikažite tablično i grafički. Za referentno mjerilo odaberite rotametar prema kojem će se umjeravati ostali pretvornici.

- a) Grafički prikažite karakteristiku ventila, odnosno ovisnost protoka o otvorenosti ventila. Uzmite srednje vrijednosti protoka izmjerene rotametrom. Ovisno o rezultatima zaključite kakvu karakteristiku pokazuje regulacijski ventil;
- b) Tablične podatke obradite statistički (vidi prilog za tablicu!). Odredite aritmetičku sredinu, standardnu devijaciju, statičku karakteristiku, linearnost i histerezu za pojedine mjerne pretvornike.
- c) Grafički prikažite rezultate testa na skok, odredite vremenske konstante za pojedine mjerne pretvornike.

LITERATURA

1. N. Bolf, Mjerenje protoka, Predavanja iz kolegija *Mjerenja i vođenje procesa*, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, 2021.
2. K. Štahan, Mjerenje protoka, Završni rad, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagreb, 2016.
(<https://repozitorij.fkit.unizg.hr/islandora/object/fkit:485/datastream/PDF/download>)
3. N. Bolf, Mjerenje malih protoka, Mjerna i regulacijska tehnika, Kem. Ind. 64 (1-2) (2015) 98–101 (<https://hrcak.srce.hr/file/196551>)
4. N. Bolf, Mjerenje protoka mjerenjem razlike tlakova, Mjerna i regulacijska tehnika, Kem. Ind. 69 (5-6) (2020) 349–351 (<https://hrcak.srce.hr/file/347206>)
5. https://en.wikipedia.org/wiki/Flow_measurement

Tablica 1 Rezultati mjerenja

<i>Otvorenost Ventila [%]</i>	Rotametar <i>[q/Lmin⁻¹]</i>			Magnetsko osjetilo protoka [mA]			Vrtložno osjetilo protoka [mA]			Ultrazvučno osjetilo protoka [mA]			Mjerni zaslon [mA]		
100															
90															
80															
70															
60															
50															
40															
30															
20															
10															
0															
10															
20															
30															
40															
50															
60															
70															
80															
90															
100															