

MJERNA I REGULACIJSKA TEHNIKA



Uređuje: Nenad Bolf

Mjerenje i regulacija pH (II. dio)

|| H. Dorić* i N. Bolf**

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

1. Dinamičko vladanje procesa kod regulacije pH

Učinak periodičkih promjena na spremnik s miješanjem može se procijeniti iz mrtvog vremena i vremenske konstante spremnika. Ukupno mrtvo vrijeme τ_{dt} definira se kao:

$$\tau_{dt} = \tau_{dt1} + \tau_{dt2}, \quad (1)$$

pri čemu su:

τ_{dt1} – mrtvo vrijeme spremnika

τ_{dt2} – preostalo mrtvo vrijeme u krugu

Uz pretpostavku da vrijedi:

$$\tau_{dt} = 0,05 \frac{V}{F_V} \quad (2)$$

pri čemu su:

V – volumen spremnika

F_V – volumni protok kroz spremnik,

vremenska konstanta (τ_1) spremnika s miješanjem s mrtvim vremenom (τ_{dt1}) izražava se kao:

$$\tau_1 = \frac{V}{F_V} - \tau_{dt1} \quad (3)$$

Uz pretpostavke da je najmanja vrijednost vremenske konstante spremnika s miješanjem 3 minute te da je ukupno mrtvo vrijeme podijeljeno tako da 80 % pripada τ_{dt1} , a 20 % τ_{dt2} , za vremensku konstantu dobivamo izraz:

$$\tau_1 = 0,96 \frac{V}{F_V} \quad (4)$$

Vremenska konstanta izražena preko ukupnog mrtvog vremena glasi:

$$\tau_1 = 19,2 \tau_{dt} \quad (5)$$

Dinamičko pojačanje spremnika s miješanjem na periodičke poremećaje dano je sljedećom jednačinom:

$$G_d = \frac{\tau_0}{2\pi\tau_1} \quad (6)$$

pri čemu su:

G_d – dinamičko pojačanje spremnika s miješanjem jednako je omjeru postotne promjene izlaza i postotne promjene ulaza.

τ_0 – period oscilacije poremećaja,

τ_1 – vremenska konstanta spremnika.

2. Ugađanje regulatora pH

Ugađanje regulatora pH provodi se na temelju procjene tri parametra procesa:

- statičke osjetljivosti procesa
- vremenske konstante procesa
- ukupnog mrtvog vremena.

Ukupno mrtvo vrijeme je najvažniji parametar. Ono predstavlja sumu mrtvog vremena ventila, vremena potrebnog za razrjeđenje reagensa, zadržke reagensa tijekom prijenosa kroz cjevovod, mrtvog vremena miješala, zadržke tijekom prijenosa uzorka, kašnjenja signala elektrode i filtriranja signala. Ukupnu zadržku u krugu čini vrijeme potrebno da regulator prepozna poremećaj i vremena potrebnog da provede korekcijsko djelovanje.

Najveća vremenska konstanta usporava odziv i daje regulatoru dovoljno vremena da kompenzira poremećaj. Cilj je projektirati sustav za regulaciju kojemu je najveća vremenska konstanta jednaka vremenskoj konstanti procesa. Pojačanje regulatora razlikuje se za slučajeve kada je mrtvo vrijeme manje od vremenske konstante i kada je mrtvo vrijeme veće od vremenske konstante. U slučaju kada je mrtvo vrijeme manje od vremenske konstante pojačanje regulatora proporcionalno je omjeru vremenske konstante procesa i mrtvog vremena pomnoženom sa statičkom osjetljivošću procesa:

$$K_c = \frac{\tau_1}{\tau_{dt}} \cdot K_o \quad (7)$$

$$T_i = 2 \tau_{dt} \quad (8)$$

$$T_d = 0,5 \tau_{dt} \quad (9)$$

pri čemu su:

K_c – pojačanje regulatora,

K_o – statička osjetljivost procesa,

τ_1 – vremenska konstanta,

τ_{dt} – ukupno mrtvo vrijeme,

T_i – integracijska konstanta regulatora,

T_d – derivacijska konstanta regulatora.

* Hrvoje Dorić
e-pošta: hdoric@fkit.hr

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

U slučaju kada je mrtvo vrijeme veće od vremenske konstante, primjenjuju se sljedeće jednadžbe:

$$K_c = 0,3 K_o \quad (10)$$

$$T_i = 1,0 \tau_{dt} \quad (11)$$

Ugađanje regulatora treba provesti pri normalnim radnim uvjetima zbog toga što proces može biti izrazito nelinearan. Procijenjene vremenske konstante koje su ovisne o volumenu i intenzitetu miješanja moraju se korigirati u skladu s titracijskom krivuljom. Ako je titracijska krivulja strma, vremenska konstanta miješanja je manja zbog bržeg mjerenja pH.

Ugađanje se može provesti metodama otvorenog i zatvorenog kruga. Metode zatvorenog kruga treba pažljivo provoditi kako bi se uočio početak oscilacija. Oscilacije će biti približno jednakih amplituda za širok raspon pojačanja na strmom dijelu titracijske krivulje. Povećanje amplitude teško je uočiti kad se oscilacije javljaju na položenom dijelu krivulje.

Kod kontinuirane regulacije pH najveća pogreška ovisi o vrijednostima mrtvog vremena i vremenske konstante procesa.

Za slučaj da je mrtvo vrijeme veće od vremenske konstante procesa vrijedi:

$$e_{\max} \approx e \quad (12)$$

U obrnutom slučaju kada je mrtvo vrijeme manje od vremenske konstante procesa vrijedi:

$$e_{\max} \approx \frac{\tau_{dt}}{\tau_1} e \quad (13)$$

Kod regulacije šaržnih procesa odstupanja od radne točke su manja nego kod regulacije kontinuiranih procesa, ako se radna točka doseže postupno. Kada je pH vrijednost blizu zadane, potrebno je projektirati regulaciju tako da se dodaju manje količine reagensa i produži vrijeme miješanja.¹

3. Metode regulacije pH

3.1. Šaržni procesi

Glavna karakteristika šaržnih procesa je diskontinuiranost. Određena količina procesne kapljevine dopremi se u spremnik i u njemu se zadržava tijekom cijelog procesa neutralizacije.

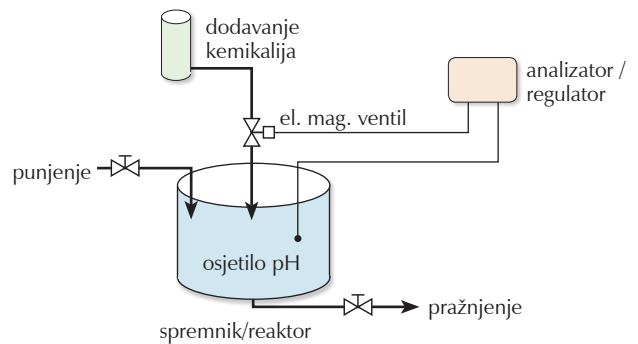
Sustav djeluje u nizu:

- punjenje spremnika (reaktora) procesnom kapljevinom;
- početak miješanja te dodavanje kemikalije do postizanja zadane radne točke pH;
- pražnjenje spremnika i daljni transport procesne kapljevine.

Za regulaciju šaržnih procesa upotrebljavaju se dvopoložajni regulatori. U fazi dodavanja i miješanja kemikalija regulator uključuje i isključuje pumpu, ili otvara i zatvara elektromagnetski ventil.

Mjerenjem razine mjeri se količina kapljevine u spremniku i, ako otopina nije na zadanoj razini, regulacija pH i miješanje se zauzstavljaju.

Kod dimenzioniranja izvršne sprave u obzir treba uzeti vremensku zadržku od trenutka dodavanja kemikalije do mjerenja stvarne vrijednosti pH. U slučaju predimenzioniranosti izvršne sprave u sustavu se javlja neprihvatljivi prebačaj. Zadržka, odnosno prebačaj može se smanjiti povećanjem brzine miješanja.²



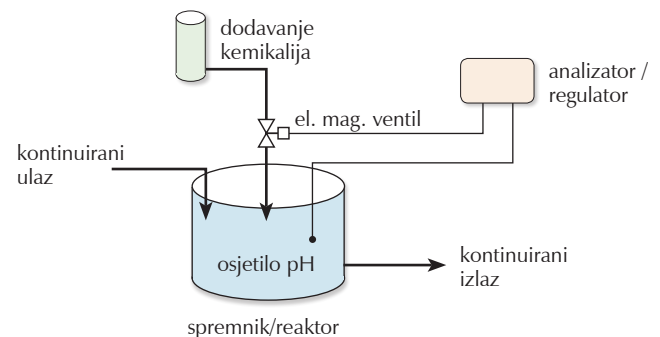
Slika 1 – Regulacija pH u šaržnom procesu

3.2. Protočni-kotlasti reaktori/spremnici s miješanjem

Sustav je sličan šaržnom, ali ima kontinuirani ulaz kapljevine. Kada je prisutan kontinuirani ulaz, potrebna je regulacija s mrtvim pojasom. Njezina uloga je da održava upravljačku spravu "uključenom" dulje vrijeme u usporedbi sa slučajem kada mrtvi pojas nije prisutan. Rezultat toga je stabilniji rad.

Izvršna sprava ovog sustava je pumpa ili dvopoložajni ventil. Čest je slučaj da sustav ima dvije izvršne sprave. Svaka izvršna sprava dovodi različite količine kemikalije, a radne točke su im različite.

Vrlo je bitno osigurati dobro miješanje, odnosno spriječiti nedovoljno miješanje. U pravilu, za dobru regulaciju procesa vrijeme zadržavanja treba biti veće 10 minuta. Nedostatak ovog sustava je što nema stabilan izlaz jer pH oscilira između dvije vrijednosti.²



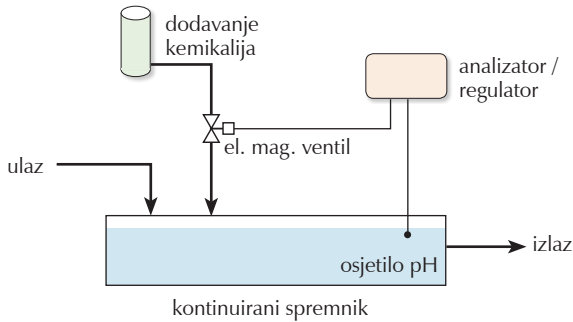
Slika 2 – Regulacija pH u protočno kotlastom reaktoru / spremniku s miješanjem

3.3. Kontinuirani spremnici

U ovom sustavu primjenjuje se P regulator kao i u prethodnom. Razlika je u tome što je kod kontinuiranog spremnika zadržka između dodavanja kemikalije i mjerenja pH barem jedna minuta. Tolika vremenska zadržka posljedica je prolaska procesne kapljevine kroz dugački spremnik, korito ili niz od više spremnika.

Za regulaciju pH primjenjuje se regulator s vremenski proporcionalnim izlazom (engl. *time proportioning output*). On djeluje kao prekidač koji pokreće pumpu ili elektromagnetski ventil. Ovisno o razlici izmjerene i željene pH vrijednosti regulator djeluje tako da određuje koliko dugo će elektromagnetski ventil biti otvoren ili koliko će pumpa raditi, odnosno koliko dugo će se kemikalija dodavati.

Da bi se kemikalija ravnomjerno dodavala i miješanje odvijalo postupno vrijeme oscilacije treba biti kraće od vremenske zadržke sustava. Rezultat toga je dobro miješanje procesne kapljevine i kemikalije te male varijacije pH.²



Slika 3 – Regulacija pH u protočnom spremniku

4. Kontinuirana regulacija pH

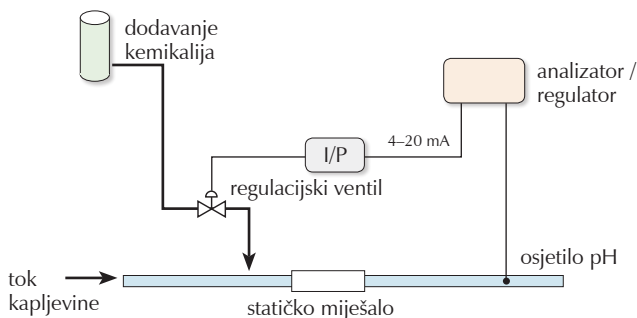
Kod ovog načina regulacije primjenjuje se P-regulator. Regulacija se primjenjuje u slučajevima u kojima pH treba blago podestiti ili kada je pH vrijednost u području ispod $\text{pH} = 4$ ili iznad $\text{pH} = 10$. Sustav se sastoji od sljedećih elemenata:

- osjetilo pH,
- analizator/regulator,
- I/P pretvornik – daje pneumatski signal proporcionalan signalu iz regulatora,
- pneumatski ventil – regulira protok kemikalije u proces,
- miješalo – nalazi se između mjesta dostave kemikalije i osjetila pH.

U sustav se umjesto pneumatskog ventila može ugraditi pumpa s promjenjivim brojem okretaja ili električni ventil.

Za dobru regulaciju u ovom sustavu važno je miješanje i vremenska zadržka od dodavanja kemikalije do osjetila pH. Miješanje mora biti potpuno, a vremenska zadržka ne smije biti veća od nekoliko sekundi. Ako je zadržka velika, dolazi do povratne oscilacije pH (engl. *cycling back*).

Ako otopina prolazi kroz cijev, potrebno je primijeniti statičko miješalo koje u kratkom vremenu ostvaruje dobro miješanje.



Slika 4 – Kontinuirana regulacija pH u cijevi

U praksi postoje i posebne modifikacije kontinuirane regulacije pH:

- Sustav u kojem se primjenjuje *PI-regulator*. Primjenjuje se u pravilu za regulaciju procesa koji imaju vremensku zadržku veću od približno 8 minuta između dodatka kemikalije i mjesta mjerenja pH. To se ostvaruje primjenom tzv. *sample/hold* funkcije.
- Sustav sličan prethodnom u kojem se primjenjuje *dvopoložajni regulator* kao u sustavu s kontinuiranim spremnikom. Sustav se primjenjuje kad je potrebna čvrsta regulacija pH. Vremenska zadržka kreće se između jedne i osam minuta. Ako je dodavana kemikalija abrazivna ili začepljuje male otvore, umjesto kontinuiranih primjenjuju se elektromagnetski ventili i dvopoložajni regulatori. Time se izbjegava erozija unutarnjih dijelova ventila i osigurava pouzdanije dodavanje reagensa.²

Zaključak

Dobra regulacija pH važna je iz ekonomskih i ekoloških razloga. Ekonomski cilj je povećanje dobiti i smanjenje troškova proizvodnje, dok je ekološki cilj neutralizirati štetne otpadne tvari prije ispuštanja u okoliš.

Regulacija pH zahtjevan je zadatak zbog velikog raspona koncentracije iona, velikog omjera najvećeg i najmanjeg protoka, ogromne osjetljivosti sustava koji su neusporedivo veći u usporedbi s drugim sustavima. Dodatne poteškoće predstavljaju problemi vezani uz odabir, instalaciju i održavanje instrumentacije, opreme i cjevovoda.³

Niti jedan slučaj regulacije pH nije tipičan jer se u različitim sustavima javljaju različiti problemi. Ova činjenica dodatno otežava regulaciju jer nema univerzalnog rješenja, već se svakoj regulaciji pH treba pristupiti posebno.

Popis simbola

F_V – volumni protok kroz spremnik

G_d – dinamičko pojačanje spremnika s miješanjem

K_c – pojačanje regulatora

K_o – statička osjetljivost procesa

τ_0 – period oscilacije poremećaja

τ_1 – vremenska konstanta procesa

τ_d – ukupno mrtvo vrijeme regulacijskog kruga

T_{dt1} – mrtvo vrijeme spremnika

T_{dt2} – preostalo mrtvo vrijeme u regulacijskom krugu

V – volumen spremnika

Literatura

1. D. L. Hoyle, G. K. McMillan, pH Control, u: B. G. Liptak, Instrument Engineer's Handbook, 3rd Ed.: Process Control, Boca Raton, CRC Press, 2006, str. 1328–1361.
2. http://www.omega.com/green/pdf/PHCONTROL_REF.pdf (10. 9. 2015.).
3. <http://www.omega.com/techref/phtour.html> (10. 9. 2015.).