

# MJERNA I REGULACIJSKA TEHNIKA

Uređuje: Nenad Bolf



N. Bolf\*

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

## Regulacija temperature (I. dio)

Regulacija temperature u farmaceutskim i kemijskim laboratorijima, kao i na pilot postrojenjima i industrijskim procesima, zahtijeva sustave za vođenje velike dinamike. Kod regulacije temperature u reaktorima, endotermne i egzotermne reakcije treba kompenzirati velikom brzinom i pouzdanošću sustava za vođenje. Pri definiranju prikladnog sustava potrebno je uzeti u obzir vrstu reaktora, djelotvornosti izmjene topline, kvalitetu komponenata sustava te radne uvjete koji se očekuju tijekom procesa.

Temperatura je često ključna veličina za proces. Bitna je za kemijske reakcije, fermentaciju, izgaranje, sušenje, kalcinaciju, kristalizaciju, ekstruziju, brzinu razgradnje itd., a govori i o stanju (sastavu) na plitici destilacijske kolone. Dobra regulacija temperature rezultira manjim defektima i većim prinosima tijekom kristalizacije, brze termičke obrade silikonskih pločica u proizvodnji poluvodiča i sl. U kotlovima je temperatura važna za predgrijavanje vode i zraka, viskoznost loživog ulja i regulaciju pregrijavanja pare. U radu spalionica optimalna temperatura garantira uništavanje opasnih spojeva uz minimalan utrošak energije. Regulacija temperature u hladnim komorama smanjuje kontaminaciju i brzinu razgradnje u farmaceutskoj i biokemijskoj proizvodnji, kao i kod proizvodnje napitaka i hrane.

Dobra regulacija temperature produljuje vijek trajanja procesne opreme (npr. reaktorsko staklo ili vatrostanle peći) ako temperatura ne prelazi zadane granice. Nagle promjene protoka rashladnog sredstva ili pare mogu uzrokovati stres na opremi i poremećaj u sustavu pomoćnih medija (engl. *utilities*). Zato je, također, važno pratiti djelovanje regulatora i primijeniti odgovarajuće metode (npr. ograničenje brzine promjene radne točke i preventivnu logiku) kako bi se spriječile brze promjene ili oscilacije. Budući da se regulacija temperature obično postiže izravnom ili neizravnom manipulacijom toplinskog toka u sustavu ili iz sustava, smanjenje prebačaja i oscilacija temperature smanjuje i potrošnju energije.

Zanimljivo je da je sporost odziva temperaturnog procesa najveći izvor problema, ali i mogućnosti za čvrstu regulaciju temperature. Sporost otežava ugađanje jer za provedbu testova u otvorenom ili zatvorenom regulacijskom krugu treba vremena i strpljenja. Istodobno, sporost odziva (velika vremenska konstanta) omogućava primjenu većeg parametra pojačanja u regulatoru.

Nonlinearost procesa dodatno otežava ugađanje regulacije zbog ovisnosti statičke osjetljivosti procesa (engl. *process gain*) o radnim uvjetima i opterećenju. Spori odziv termoparova i otporničkih osjetila temperature u zaštitnom tuljcu (engl. *thermowell*) usporava temperaturni odziv i mogućnost regulatora da brzo reagira na poremećaje.

Ipak, nakon što je regulacijski krug temperature dobro ugođen, odstupanje je obično manje od granica pogreške mjernog osjetila i pretvornika.



Slika 1 – Komercijalni termostatski sustav za regulaciju temperature u reaktoru

### Regulacija temperature u reaktorima

Regulacija temperature u reaktorima veoma je važna za kvalitetu produkta, brzinu i troškove proizvodnje. Kod kontinuiranih reaktora ciljevi su obično:

- održati temperaturu na radnoj točki po mogućnosti bez oscilacija;
- intervencije operatora smanjiti na minimum;
- minimalna potrošnja pomoćnih tvari.

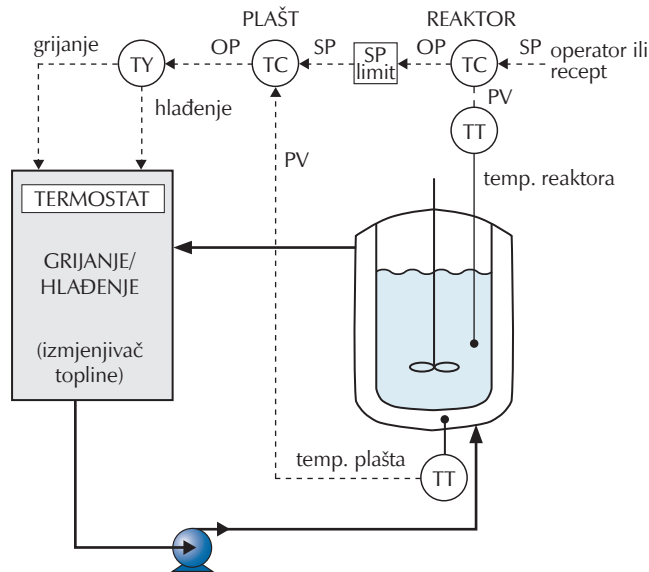
Kod šaržnih reaktora postoje još i sljedeći zahtjevi:

- brzo grijanje ili hlađenje do novozadane radne točke bez oscilacija i s minimalnim prebačajem;
- stabilan odziv na pojavu poremećaja (npr. egzotermne kemijske reakcije).

Termostatski sustavi razvijeni su za zahtjevne primjene u kemijskoj i farmaceutskoj industriji, kao što su regulacija temperature reaktora, autoklava, miniplanta/pilot sustava, reaktorskih blokova i kalorimetara. Pružaju rješenja za regulaciju temperature na širokom industrijskom spektru s kapacitetima od 0,5 kW pa sve do preko 100 kW.

\* Prof. dr. sc. Nenad Bolf  
e-pošta: [bolf@fkit.hr](mailto:bolf@fkit.hr)

Temperatura se obično regulira u staklenim ili čeličnim reaktorima. Čelični reaktori su robusniji i izdržljiviji. Stakleni reaktori omogućuju pogled u reaktoru, ali zahtijevaju neke mjere za sigurnu primjenu. U reaktoru se nalazi reakcijska smjesa kojoj treba održavati temperaturu na zadanoj vrijednosti. Unutarnja posuda okružena je plaštom koji sadrži tekućinu za prijenos topline. Sustav za regulaciju temperature spojen je u pravilu s plaštom reaktora, a regulacija izvedena u kaskadnoj strukturi o čemu smo već pisali (<http://silverstripe.fkit.hr/kui/assets/Uploads/Mjerna-665-666.pdf>), slika 2.



Slika 2 – Sustav za regulaciju temperature reaktora

Za regulaciju temperature sustav kontinuirano pumpa tekućinu za prijenos topline kroz plašt reaktora. Nagle promjene temperature u reaktoru dinamički se kompenziraju brzim grijanjem ili hlađenjem.

Pri odabiru sustava za dinamičnu regulaciju temperature u obzir se moraju uzeti svi očekivani radni uvjeti i faktori koji utječu na proces. Cilj je ostvariti optimalnu regulaciju temperature za konkretnu primjenu. Na prvom mjestu treba biti sigurnost. Stabilnost procesa je također ključna. Tu je i znatno ulaganje pri čemu treba odabrati dugoročno rješenje prikladno za očuvanje vrijedne reaktorske opreme.

### Rad i stabilnost procesa

Materijali i konstrukcija reaktora imaju značajan utjecaj na regulaciju temperature. Naravno, prijenos topline razlikovat će se kroz staklenu i čeličnu stijenku. Površina i debljina stijenke reaktorske posude također su veoma bitni. Dobro miješanje smjese u reaktoru važno je za postizanje homogenosti, što osigurava optimalnu izmjenu topline.

Specifikacije u Direktivi o tlačnoj opremi 97/23/EG i proizvođači reaktora definiraju maksimalni tlak za svaki tip reaktora.

Sljedeći kriterij je maksimalna temperaturna razlika (tzv.  $\Delta T$  ograničenje). Radi se o maksimalnoj dopuštenoj razlici između temperature tekućine za prijenos topline i temperature reakcijske smjese. Stakleni su reaktori osjetljiviji na toplinski stres od čeličnih. U sustavu za vođenje potrebno je definirati granicu  $\Delta T$  i obično je ograničiti po jedinici vremena (npr.  $2\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$ ).

U termostatskom sustavu za regulaciju temperature tri komponente značajno utječu na stabilnost procesa:

- izvedba izmjenjivača topline
- pumpa tekućine za izmjenu topline
- regulator temperature.

Sustav za regulaciju temperature mora imati odgovarajući kapacitet hlađenja/grijanja. Kapacitet hlađenja/grijanja uvelike utječe na brzinu postizanja zadane temperature. Za određivanje kapaciteta grijanja/hlađenja treba uzeti u obzir masu kapljevine, potrebnu razliku u temperaturi, željeno vrijeme zagrijavanja, kao i specifični toplinski kapacitet medija za izmjenu topline.

### Određivanje potrebne snage grijanja ili hlađenja

$$P = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{t}$$

$P$  – potrebna snaga/kapacitet grijanja ili hlađenja, kW

$m$  – masa tvari, kg

$c$  – specifični toplinski kapacitet tvari,  $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$   
( $c_{\text{voda}} = 4,2$ ;  $c_{\text{etanol}} = 2,5$ ;  $c_{\text{silikonsko ulje}} = 1,8$ )

$\Delta T$  – željena razlika temperature,  $^{\circ}\text{C}$

$t$  – vrijeme grijanja ili hlađenja, s

Sustavi za regulaciju temperature dostupni su sa zračnim ili vodenim hlađenjem. Vodom hlađene jedinice moraju biti priključene na postojeći dovod rashladne vode. Oni rade tiše i ne oslobađaju toplinu u laboratorij.

Ugrađena pumpa termostatskog sustava za regulaciju temperature mora biti dovoljno snažna da bi postigla zadane protoke pri konstantnom tlaku. Pumpa treba ostvariti radni tlak brzo i uz kontrolu ograničenja tlaka. Podešavanje kapaciteta crpke treba se provoditi u koracima. Radni uvjeti i specifikacije tlaka moraju uvijek biti zadovoljeni. Napredni sustavi regulacije temperature imaju pumpe koje se automatski prilagođavaju promjeni viskoznosti tekućine za prijenos topline da bi se održala energetska učinkovitost, budući da viskoznost utječe na protok i time na prijenos topline. Magnetski spregnute pumpe (engl. *magnetically coupled pumps*) osiguravaju hidraulički zatvoren toplinski krug. Pumpe sa samopodmazivanjem, također, praktički ne zahtijevaju održavanje.

Sustav tekućine za prijenos topline treba biti zatvoren kako bi se spriječio kontakt sa zrakom iz okoline. Time se sprječava prodiranje vlage i oksidacija a pritom i izlazak uljnih para u okolinu. Promjena volumena zbog promjene temperature u izmjenjivaču topline apsorbira se unutarnjom ekspanzijskom posudom prikladnih dimenzija. Hlađenjem ekspanzijske posude osigurava se da se sustav ne pregrijava. Regulacija temperature treba biti pouzdana čak i pri povišenim temperaturama okoline. Tijekom vrućih ljetnih dana sustav za regulaciju može biti posebno opterećen.

Od najveće je važnosti precizna regulacija temperature. Sofisticirana elektronika sustava za regulaciju temperature kontinuirano vodi proces, a kad se vođena varijabla promijeni brzo podešava temperaturu na zadanu vrijednost, po mogućnosti bez prebačaja i oscilacija. To će biti slučaj jedino kad su regulacijski krugovi unutar sustava ugođeni za optimalni rad.

Ukratko, stabilnost i sigurnost procesa u reaktoru ovisi o vrsti reaktora, djelotvornosti izmjene topline i kvaliteti komponenata sustava te o podešenosti parametara regulatora.

Karakteristike suvremenih termostatskih sustava za dinamičku regulaciju temperature:

- velika brzina grijanja i hlađenja
- široko temperaturno područje,
- stabilnost i ponovljivost za potrebe istraživačkog rada
- inteligentno nadziranje rada i ugađanje parametara regulatora za optimalno vođenje.

## Investicija i troškovi

Kvalitetan termostatski sustav za regulaciju temperature velika je investicija, no u većini slučajeva troškovi reaktorskog sustava i sirovina znatno su veći. Iz tog razloga sustav za regulaciju temperature treba raditi pouzdano i zaštititi reaktorski sustav i tvari u njemu.

Pumpa integrirana u sustav za vođenje mora osigurati odgovarajuću tlak. Ako se radi o samopodmazujućoj pumpi, radit će praktički bez trošenja, minimizirajući troškove održavanja i zastoje. Drugi važan faktor je temperaturno područje. Što je područje šire, sustav će biti fleksibilniji za rad na različitim temperaturama. To je česta potreba u istraživačkim laboratorijima koji provode velik broj istraživanja.

Ako se radi sa sustavom hlađenja s vodom, treba provjeriti ima li robusni kondenzator integriran u jedinici. Tako će se izbjeći da zaprljana rashladna voda začepi izmjenjivač topline. Sustav sa zračnim hlađenjem nema troškova rashladne vode. Važne su i dimenzije, posebno ako se radi u skućenom laboratoriju. Treba razmotriti i koliko je prostora dostupno za konektore i adekvatan protok zraka u termostatsku jedinicu i iz nje.

Konačno, sustav, s obzirom na investiciju, treba imati što dulji vijek trajanja. Pri tome treba provoditi preventivno održavanje, kao što je čišćenje kondenzatora na zrakom hlađenim jedinicama. Kvaliteta usluge i podrške koju pruža proizvođač također je bitna. Osim pružanja kompetentnih savjeta, ugledni proizvođač će pružiti podršku kupcu tijekom instalacije i pokretanja, kao i dokumentaciju potrebnu za kvalifikaciju uređaja na mjestu rada.

## Sigurnost rada

Operator koji radi na sustavu odgovoran je za sigurnost rada sustava. Direktiva o strojevima 95/16/EZ i njezina izmjena 2006/42/

EC propisuje da operator mora pružiti upute korisnicima i preneti im potrebne vještine i znanje. Međutim, proizvođači sustava regulacije temperature idu i dalje – kontinuirano integriraju poboljšanja u svoje proizvode, što olakšava instalaciju, probni i redoviti rad u laboratoriju i pogonu.

Vrhunski termostatski sustavi za regulaciju temperature jasno i organizirano prikazuju bitne informacije u obliku bročanih vrijednosti, grafikona i tekstualnih obavijesti. Sve te informacije valja prikazivati na većim zaslonima. Administrator sustava obično definira kategorije korisnika i postavke. Operatori imaju ograničena prava pristupa koja im omogućuju jednostavni rad i dohvaćanje tih postavki. To olakšava rad u laboratoriju i sprječava neželjene promjene parametara i kvarove.



Slika 3 – Operatorsko sučelje

Postoji i mogućnost daljinskog pristupa sustavu mrežnim putem. Suvremena standardna sučelja kao što su Ethernet ili USB pružaju mogućnosti za daljinski pristup svim funkcijama sustava, a time i naprednom vođenju procesa. O strukturi i načinu rada regulatora temperature pisat ćemo u jednom od sljedećih nastavaka ove rubrike.

## Literatura

- Gregory K. McMillan, *Advanced Temperature Measurement and Control*, International Society of Automation, 2011.
- Optimal temperature control of reactors, White paper, Julabo, URL: <https://www.julabo.com/sites/default/files/Downloads/News/english/Whitepaper-Optimal-Temperature-solution-EN.pdf> (12. 4. 2019.).
- <https://cpp.industrie.de/process-engineering/economical-temperature-control/> (12. 4. 2019.).
- [https://www.huber-online.com/download/brochures/Huber\\_Product-overview\\_2019\\_EN.pdf](https://www.huber-online.com/download/brochures/Huber_Product-overview_2019_EN.pdf) (12. 4. 2019.).
- <http://www.spacetechempo.eu/resources/news-and-editorial/news-container/2018/01/30/optimal-temperature-control-of-reactors/> (12. 4. 2019.).