

Laboratorij za automatiku i mjerenja (LAM) na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije

Nenad Bolf

član suradnik, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, bolf@fkit.hr

Sažetak: Laboratorij za automatiku i mjerenja (LAM) na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije (FKIT) Sveučilišta u Zagrebu čine laboratorijske instalacije sa suvremenim sustavom za vođenje koje obuhvaćaju tipične jediničnih operacija kemijske procesne industrije. Sve to podržano je najnovijom generacijom sustava za vođenje, simulacijskim softverima i cjelovitim softverskim rješenjem za postrojenja. Laboratorij nudi studentima, zaposlenicima i partnerima priliku za usvajanje temeljnih i naprednih znanja o procesnim mjerenjima i vođenju procesa primjenom najmodernije opreme i softvera. Osnovna namjena je educirati studente, doktorande i polaznike stručnih studija i cjeloživotnog obrazovanja o suvremenim mjernim uređajima, metodama vođenja procesa i analize mjernih podataka s postrojenja.

U Laboratorij se provodi i europski strukturni projekt sa zadatkom naprednog vođenja procesa kristalizacije (CrystAPC) čiji je cilj, primjenom procesne analitičke tehnologije (PAT) razviti napredne metode vođenja procesa kristalizacije, kao i oformiti tim eksperata koji će provoditi primjenska istraživanja za industriju.

Ključne riječi: procesna mjerenja, vođenje procesa, modeliranje procesa, dijagnostika procesa, optimiranje procesa, procesna analitička tehnologija, softverski senzori, edukacija

1. Uvod

Brz razvoj, nove paradigme, inteligentni uređaji, industrijski internet stvari i velike količine podataka iz industrijskih procesa kontinuirano donose nove izazove. Sve to prepoznato je na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije (FKIT) Sveučilišta u Zagrebu na kojem se u Laboratoriju za automatizaciju i mjerenje (LAM) bavi istraživanjem i razvojem na području naprednog mjerenja, nadzora i dijagnostike, vođenja, modeliranja i optimizacije procesa. Osnovna namjena je poučiti studente, doktorande, polaznike stručnih studija i cjeloživotnog obrazovanja o suvremenim

mjernim metodama, vođenju procesa, sustavima za vođenje i optimizaciji. Cilj je razvijati i održavati suvremeni laboratorij za podučavanje studenata redovitih studija, specijalističkih studija, polaznika cjeloživotnog obrazovanja, kao i podržati kemijsku procesnu industriju u praćenju najnovijih trendova u automatizaciji i Industriji 4.0. Također je to potpora seriji edukacija što se provode za potrebe industrije iz područja automatskog vođenja, mjerenja i optimiranja sustava za vođenje.

U Laboratorija za automatiku i mjerenja provode se istraživanja i razvoj na području modeliranja, mjerenja, dijagnostike i vođenja procesa. U okviru djelatnosti projektiraju se sustavi za vođenje, dijagnosticira stanje procesa i procesne opreme, razvijaju softver senzori za procjenu ključnih veličina, optimiraju procesi i primjenjuju metode naprednog vođenja procesa. Pri tome je razvijena intenzivna suradnja s procesnom industrijom.

U posljednjih nekoliko godina FKIT je u suradnji s tvrtkom Siemens Hrvatska i partnerskom tvrtkom ARP Lučko, kao i tvrtkom PHB automatika izgradio ili modernizirao aparature za podučavanje mjerenja i automatskog vođenja procesa koje imaju praktičnu primjenu kao nastavna pomagala, ali i kao laboratorijski ekvivalenti industrijskih jedinica. Nastavnici i suradnici prepoznali su u tome izazove koje donose ubrzani razvoj sustava za vođenje, inteligentna osjetila, internet stvari te velike količine podataka iz industrijskih procesa, što je i vizija Industrije 4.0.

Također u nedavnom pokrenutom projektu Europskih strukturnih i investicijskih fondova krenulo je istraživanje pod nazivom *Napredno vođenje procesa kristalizacije* (engl. *CrystAPC - Crystallization Advanced Process Control*). Ono obuhvaća pristup projektiranju procesa nazvan QbD (engl. *Quality by Design*) i QbC (engl. *Quality by Control*) u kojemu se razvija proces i projektira napredno vođenje procesa kako bi se ostvarila visoka učinkovitost i ponovljivost eksperimenta i proizvodnih procesa.



Slika 1: Dio Laboratorija za automatizaciju i mjerenja s operatorskim sučeljem

Procesna analitička tehnologija (engl. *process analytical technology, PAT*) predstavlja način projektiranja, praćenja i vođenja proizvodnih procesa kontinuiranim mjerenjem ključnih pokazatelja kvalitete i rada procesa. Mjeriti se mogu svojstva sirovina, međuprodukata i produkata, a najčešće se mjere ključne veličine koje utječu na djelotvornost procesa i kvalitetu produkta. U ovom kontekstu pojam “analitički” može obuhvatiti kemijske, fizikalne, mikrobiološke i matematičke analize te analize rizika koje se, po potrebi, provode integrirano.

Procesna analitička tehnologija usvaja se u farmaceutskoj industriji, a sve se više primjenjuju u industrijskoj proizvodnji, no glavnu primjenu i dalje nalazi u istraživanju i razvoju. Cilj je bolje razumijevati proces u ranoj laboratorijskoj fazi razvoja te kasnije tijekom razvoja i uvećanja. Razvoj i primjenu PAT-a omogućuje sve veći broj podataka iz procesa i povezivanje s naprednim alatima za modeliranje. Nove tehnologije i nove primjene postojećih tehnologija proširile su PAT na praktički sve jedinične operacije u kojima se proizvode lijekovi, što omogućuje stvaranje novih znanja potrebnih za razvoj lijekova.

2. Organizacija Laboratorija za automatiku i mjerenja

Laboratorij za praktično obrazovanje sa sustavom za vođenje i laboratorijskim uređajima predstavlja tipične industrijske jedinice sa svim funkcionalnostima kao i na stvarnom postrojenju. U laboratoriju su smješteni serijski povezani protočno-kotlasti reaktori s plaštem, izmjenjivači topline, proces šaržne destilacije i šaržni reaktor, kao i niz laboratorijskih postava za procesna mjerenja i analizu dinamike procesa.

Sustav za vođenje

Na aparaturama je ugrađena suvremena oprema za mjerenje i vođenje poduprta sustavom SIMATIC PCS7 najnovije generacije, koji omogućava kontinuirano i učinkovito eksperimentiranje. Konkretno, instaliran je sustav za nadzor i vođenje procesa, oprema za mjerenje i vođenje, a ugrađeni su elektro-ormari i instalacije za povezivanje s laboratorijskim procesima. Uz to, SCADA sustav na četiri zaslona konfiguriran softverom WinCC nudi grafičko sučelje koje oponaša stvarni sustav za vođenje postrojenja.

Vođenje se temelji na regulatoru (kontroleru) Simatic S7-400 (CPU 414-3 PN/DP) s modulom za sučelje ET200M na Profibus DP. Arhitekturu sustava PCS7 čine ES/Master OS, Standby OS i regulator serije S7-400. Cjeloviti DCS (engl. *distributed control system*) i sigurnosno orijentirani sustav automatizacije (SAS) namijenjeni su primjeni i na velikim i malim postrojenjima.

Oprema je ugrađena u elektro-ormar i povezana s mjernim pretvornicima i aktuatorima. Za vođenje procesa konfiguriran je PCS 7 sustav najnovije generacije. Softver za vođenje i vizualizaciju razvijen je pomoću *Advanced Process Library* (APL).

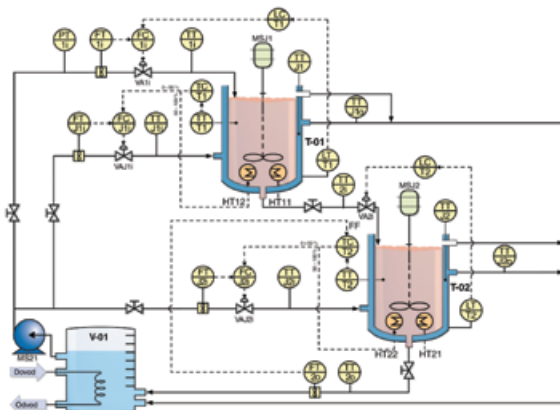
Sustav za vođenje konfiguriran je tako da omogućuje primjenu svih temeljnih metoda vođenja procesa, kao i naprednih funkcija. Tako studenti i polaznici cjeloživotnog obrazovanja mogu upoznati funkcionalnu strukturu regulacijskog kruga, dinamiku

procesa, ulogu i funkciju regulatora, kako ugoditi regulator, potom osnovne i napredne metode vođenja procesa: vođenje povratnom i unaprijednom vezom, kaskadnu regulaciju, regulaciju omjera, podijeljenu regulaciju, selektivnu regulaciju, kao i viševeličinsko vođenje, kompenzaciju mrtvog vremena, kompenzaciju nelinearnosti i prilagodljivo vođenje. Tu su i teme o softverskim sensorima i inferencijskom vođenju i analiza rada izvršnih elemenata (regulacijskih ventila).

U tablici 1 dana je lista laboratorijskih vježbi, pri čemu su istaknuti svrha i cilj koji se ostvaruju radom na pojedinoj vježbi, metode vođenja koje se primjenjuju i mjerna i regulacijska oprema koja se pri tome upoznaje i analizira.

Tablica 1: Laboratorijske vježbe iz područja vođenja procesa

Vježba	Proces	Svrha i cilj	Metode vođenja	Mjerna i regulacijska oprema
C-10	Spremnik kapljevine	Elementi regulacijskog kruga. Djelovanje regulatora.	Spremnik kapljevine	Elementi regulacijskog kruga. Djelovanje regulatora.
C-20	Serijski povezani izmjenjivači topline/reaktori	Osnovne metode vođenja	Serijski povezani izmjenjivači topline/reaktori	Osnovne metode vođenja.
C-30	Cijevni izmjenjivač topline	Vođenje procesa s raspodijeljenim veličinama stanja.	Cijevni izmjenjivač topline	Vođenje procesa s raspodijeljenim veličinama stanja.
C-40	Regulacija temperature i protoka.	PID	Regulacija temperature i protoka.	PID regulator.
C-50	Kompenzacija mrtvog vremena.		Kompenzacija mrtvog vremena.	



Slika 2: Struktura vođenja serijski povezanih reaktora/izmjenjivača topline

Mjerna pretvornici i mjerna tehnika

U laboratoriju se mogu upoznati i usvojiti načela rada mjernih pretvornika tlaka, temperature, razine i protoka koji se najčešće susreću u proizvodnji. Tu su i primjeri mjerenja kao što su mjerenje vodljivosti, pH, toplinskog toka, ali i analitički instrumenti. Svrha je prikazati osnovna mjerna načela i mjerne metode koje se susreću u industrijskoj praksi te podučiti kako odabrati, nadgledati i održavati rad mjernih pretvornika u suvremenim sustavima za vođenje.

U tu svrhu eksperimentalno se određuju osnovne karakteristike mjernih osjetila i pretvornika: dinamika osjetila, proračun linearnosti i histereze, osjetljivost pretvornika, klizanje karakteristike, ponovljivost i obnovljivost, kao i metode obrada i prijenosa signala te uklanjanja mjernih smetnji i šuma. Slijedi analiza mjerne pogreške i mjerne nesigurnosti.

Tablica 2: Laboratorijske vježbe iz područja procesnih mjerenja

Vježba	Opis	Svrha i cilj	Mjerna i regulacijska oprema
F-10	Mjerenje protoka	Upoznati načela rada i metode mjerenja protoka	Mjerni zaslon, rotametar, magnetski, vrtložni, Coriolisov i ultrazvučni mjerni pretvornik Regulacijski ventil.
L-10	Mjerenje razine	Upoznati načela rada i metode mjerenja razine	Tlačni, kapacitivni, radarski, ultrazvučni mjerni pretvornici. Vagarski modul.
P-10	Mjerenje tlaka	Upoznati načela rada i metode mjerenja tlaka	Bourdonova cijev, piezoelektrični, piezootpornički i kapacitivni pretvornici.
T-10	Mjerenje temperature	Upoznati načela rada i metode mjerenja temperature.	Termoparovi i otpornička osjetila temperature.
T-30	Infracrvena termografija	Bezkontakno mjerenje temperature	Termografska kamera. Pirometar.
D-10	Dinamičko vladanje procesa	Analiza statičkih i dinamičkih karakteristika pretvornika i procesa	Mjerni pretvornici temperature. Grijalo. Regulator

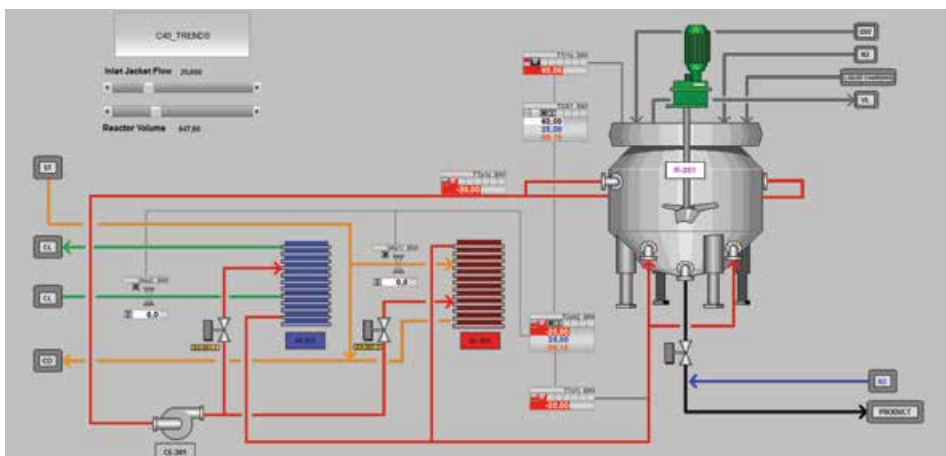


Slika 3: Vježba mjerenja i regulacije protoka u laboratoriju LAM2

Simulacijska platforma

Pored “stvarnog” (fizičkog) hardvera i procesa, instaliran je i “virtualni” hardver i simulacija procesa primjenom SIMIT *Simulation framework*-a.

Simulacijski paket emulira rad opreme i procesa u realnom vremenu. Simulacijskim paketom modeliraju se tipične situacije i dinamika procesa upravo onako kako ih nailazimo u procesnoj industriji. U virtualnom okruženju moguće je na intuitivan način educirati studente i operatore industrijskih postrojenja. Korisnici rade s realnim radnim zaslonima i strategijama vođenja, prakticirajući tipične situacije s postrojenja, kao i procedure pokretanja i završetka rada postrojenja.



Slika 4: Simulator kotlastog reaktora s grijanjem i hlađenjem putem plašta

3. Aktivnosti djelatnika i laboratorija

Djelatnici Laboratorija bave se projektiranjem sustava za vođenje procesa, dijagnosticiranjem procesa i opreme, optimizacijom rada postrojenja, razvojem softverskih senzora i naprednih metoda vođenja procesa. Stečeno znanje primjenjuje se na industrijskim postrojenjima i laboratorijskim sustavima istraživanja i razvoja u intenzivnoj suradnji s procesnom industrijom putem velikog broja projekata.

Dijagnostika i optimizacija

U industrijskim se postrojenjima problemi pojavljuju zbog različitih uzroka, poput problema s opremom, kvara na instrumentima, loše podešenih regulatora, poremećaja u procesu i električnih smetnji. Provedbom detaljne analize trendova varijabli procesa može se pronaći uzrok problema i optimizirati vođenje procesa.

Nadgledanje i dijagnostika procesa

Praćenje i dijagnostika imaju ključnu ulogu za siguran i optimalan rad postrojenja. Analizom dinamičkog vladanja sustava praćenjem ključnih varijabli otkrivaju se nestabilnost i oscilacije, a moguće je provoditi i prediktivno održavanje postrojenja kontinuiranim nadgledanjem stanja opreme i procesa.

Napredno vođenje procesa

Osmišljavanje i primjena cjelovitih rješenja za projekte naprednog vođenja u kemijskoj, farmaceutskoj, petrokemijskoj i srodnim industrijama. To uključuje ugađanje regulatora i optimizaciju regulacije, kao i primjenu naprednih strategija vođenja u već postojećim sustavima. Također, važna je i primjena PAT-a za optimalno vođenje procesa na temelju informacija iz procesnih analizatora.

Automatizacija manjih i laboratorijskih procesa

Instaliranje cjelovitih sekvencijalnih i kontinuiranih sustava za vođenje za automatizaciju šaržnih i polušaržnih procesa s jednostavnim i funkcionalnim operatorskim sučeljima.

Edukacije

Tečajevi i treninzi zadiru u suštinu vođenja procesa i daju niz praktičnih primjera iz industrije. Tijekom seminara analiziraju se praktični primjeri s realnih postrojenja,

primjenjuju se interaktivni simulatori za uvježbavanje i provjeru stečenih znanja. Po završetku seminara polaznici će poznavati i razumjeti ključne elemente vezane uz rad, dijagnostiku, mjerenja, vođenje i optimiranje procesa.

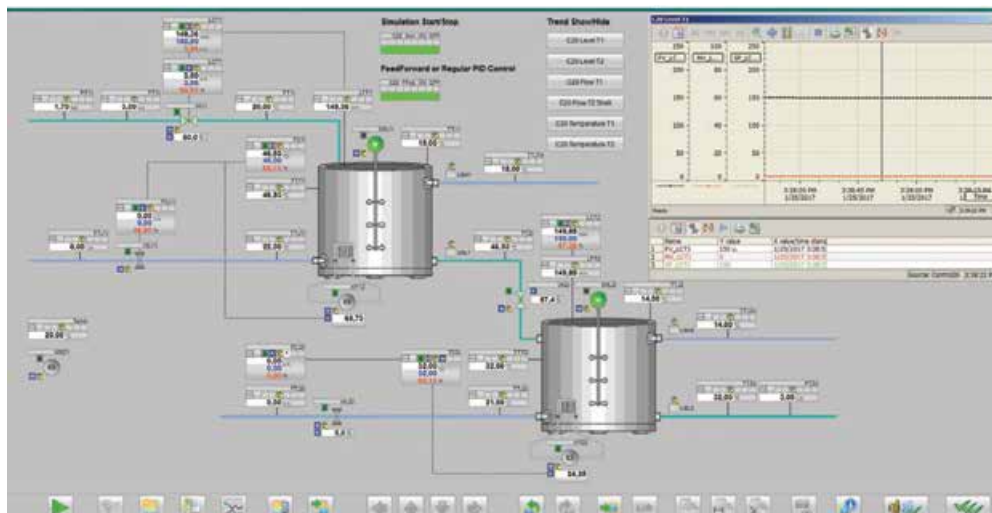
Tablica 3: Praktične edukacije za industriju

	Edukacija	Polaznici
AVP-1	Automatsko vođenje procesa	Inženjeri i voditelji proizvodnje
AVP-2	Napredno vođenje procesa	Inženjeri i voditelji proizvodnje
AVP-3	Dijagnostika i optimiranje procesa	Inženjeri i voditelji proizvodnje
AVP-4	Procesna mjerenja	Inženjeri i voditelji proizvodnje, operatori, inženjeri na održavanju i tehničari na održavanju
AVP-5	Vođenje i optimiranje šaržnih procesa	Inženjeri, operatori i voditelji proizvodnje
AVP-6	Statistička i prediktivna analiza procesa	Inženjeri i voditelji proizvodnje

Laboratorij je dostupan i drugim institucijama i tvrtkama za simuliranje procesa i obuku svojih zaposlenika za rad u stvarnom okruženju. U međuvremenu laboratorij se priprema za sljedeći korak – virtualizaciju. Ona uključuje nabavu softverskih alata za modeliranje i simuliranje stvarnih industrijskih scenarija. Nakon završetka te faze to će uistinu biti doprinos viziji Industrije 4.0.



Slika 5: Računalno sučelje koje oponaša industrijsku salu za vođenje postrojenja



Slika 6: Operatorsko sučelje za vođenje procesa

4. Primjena procesne analitičke tehnologije i napredno vođenje procesa u realnom vremenu

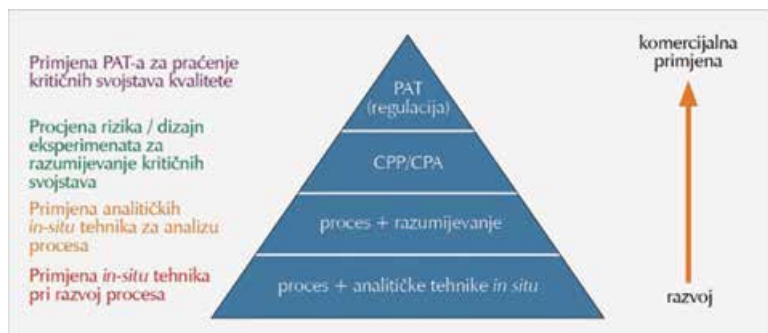
Procesna analitička tehnologija (PAT) jedan je aspekt od velikog značaja za industriju opisan u “dobroj proizvodnoj praksi (cGMP) za 21. stoljeće”. Inicijativa cGMP potiče znanje i razumijevanje procesa te postavlja PAT i napredno vođenje procesa kao ključne elemente. PAT i napredno vođenje omogućuju farmaceutskim tvrtkama postizanja boljeg nadzora nad procesima, održavanje kvalitete u proizvodnom procesu i praćenje procesa u stvarnom vremenu.

Cilj istraživanja koje se provodi u Laboratoriju je razviti napredne metode vođenja procesa kristalizacije, kao i oformiti tim eksperata koji će provoditi primjenska istraživanja za industriju. Prijavitelj ovog projekta je FKIT, a partner je poduzeće MKP.

Istraživanjem se razvija laboratorijski sustav za napredno vođenje kristalizacije. Pojedine procesne veličine (koncentracija otopljene tvari, raspodjela veličina čestica, polimorfija) prate se primjenom kemometrijskih i empirijskih modela.

Nakon razvoja kalibracijskih modela za pojedine sustave projektira se napredno vođenje procesa temeljeno na kontinuiranom mjerenju ključnih procesnih veličina (spektrofotometrijska mjerenja - UV/VIS, FTIR; FBMR, Raman). Svrha je razviti metode vođenja procesa koje omogućuju stalni nadzor i kontrolu nad procesom, a time i dobivanje kristalnog produkta željenih karakteristika.

Ovaj projekt spada u industrijsko istraživanja što ga čine faze formuliranja tehnološkog koncepta, eksperimentalnog dokazivanja koncepta i laboratorijske validacije tehnološkog koncepta.



Slika 7: Primjena PAT-a u razvoju i proizvodnji

Krajnji korisnici rezultata projekta bit će proizvodne tvrtke u kojima se provodi proces kristalizacije, a posebno farmaceutske tvrtke u kojima je kristalizacija ključni dio proizvodnje aktivnih farmaceutskih tvari.

S obzirom na stroge zahtjeve za kvalitetom proizvoda koji se nameću u farmaceutskoj proizvodnji od izuzetne je važnosti unaprijediti proizvodnju tako da se osigura visoka i ujednačena kvaliteta proizvoda, smanji udio lošeg proizvoda i unaprijedi proizvodnja na način da se smanji potrošnja energenata i pomoćnih tvari.

Primjena ovog i sličnih istraživanja nužna je za kontinuirano praćenje i vođenja procesa kristalizacije što će skratiti vrijeme proizvodnje, održati visoku kvalitetu proizvoda i donijeti uštede. Štoviše, novije analize i istraživanja predviđaju se da će industrijske tvrtke koje ne prihvate ove promjene ili s njima ne krenu na vrijeme promjene zaostajati za konkurentima koji su pravovremeno osuvremenili proizvodne procese.



Slika 8: Reaktor u kojem se provodi eksperimentalno istraživanje

Literatura

- [1] Bolf, N., Mohler, I., Dorić, H.: Laboratorij za mjerenja i vođenje procesa - LAM, Kemija u industriji, Vol. 66 (2017) 7-8, str. 450-453
- [2] Bolf, N.: Laboratorij za automatizaciju i mjerenja (LAM) na FKIT-u – mjesto za praktično učenje vođenja procesa, Kemija u industriji, Vol. 69 (2019) 9-10, str. 562-564
- [3] European Structural and Investment Funds, KK.01.1.1.07.0017 (CrystAPC – Crystallization Advanced Process Control). <http://crystAPC.fkit.hr>