

Regulacija temperature u šaržnim procesima

Kovačević, Eva

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:125172>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Eva Kovačević

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE

Kandidatkinja Eva Kovačević

Predala je izrađen završni rad dana: 18. rujna 2024.

Povjerenstvo u sastavu:

prof. dr. sc. Nenad Bolf, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog
inženjerstva i tehnologije

izv. prof. dr. sc. Igor Dejanović, Sveučilište u Zagrebu Fakultet
kemijskog inženjerstva i tehnologije

dr. sc. Srećko Herceg, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog
inženjerstva i tehnologije

izv. prof. dr. sc. Vanja Kosar, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog
inženjerstva i tehnologije (zamjena)

povoljno je ocijenilo završni rad i odobrilo obranu završnog rada pred
povjerenstvom u istom sastavu.

Završni ispit održat će se dana: 23. rujna 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Eva Kovačević

**REGULACIJA TEMPERATURE U ŠARŽNIM
PROCESIMA**

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:

prof. dr. sc. Nenad Bolf, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije

Članovi ispitnog povjerenstva:

prof. dr. sc. Nenad Bolf, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije

izv. prof. dr. sc. Igor Dejanović, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije

dr. sc. Srećko Herceg, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije

Zahvala

Zahvaljujem prof. dr. sc. Nenadu Bolfu na prihvaćenom mentorstvu, nesebičnoj podršci i pomoći tijekom pisanja rada.

Zahvaljujem asistentu Marku Sejdiću na bezbrojnim savjetima i smjernicama prilikom pisanja rada.

SAŽETAK

U ovom radu provelo se ugađanje i optimiranje regulacije temperature u reaktorima s ciljem postizanja uvjeta koji omogućuju optimalno vođenje bioprocasa, što je ključno za održavanje kvalitete proizvoda i djelotvornost procesa.

Regulacija temperature ima značajan utjecaj na brzinu reakcije, rast mikroorganizama, kao i na konačnu kvalitetu proizvoda u bioprocesima.

U ovom radu uspoređuju se dvije metode regulacije temperature u kotlastom reaktoru pomoću električnih grijala: dvopoložajna regulacija i vremenski proporcionalna regulacija. Dvopoložajna regulacija predstavlja jednostavan način vođenja u kojemu se grijala uključuju ili isključuju, dok se vremenski proporcionalnom regulacijom omogućila finija regulacija prilagodbom vremena rada grijala s obzirom na odstupanje od zadane temperature.

Provedeni su testovi na skok za analizu dinamičkog odziva sustava. Na temelju tih testova odredili su se parametri regulatora.

Rezultati istraživanja daju uvid i usporedbu metoda za regulaciju temperature u bioreaktoru, s posebnim naglaskom na stabilnost sustava, brzinu postizanja zadane temperature, kao i energetske učinkovitost.

Ključne riječi

vođenje procesa, šaržni reaktor, regulacija temperature, dvopoložajna regulacija, vremenski proporcionalna regulacija

SUMMARY

In this work, the tuning and optimisation of temperature control in reactors was carried out with the aim of achieving optimal control of bioprocesses, which is crucial for maintaining product quality and process efficiency.

Temperature control has a significant impact on reaction rate, microorganism growth and final product quality during bioprocessing.

This work compares two methods of temperature control in a boiler reactor with electric heaters: two-position control and time-proportional control. Two-position control is a simple type of control in which the heaters are switched on or off, while time-proportional control allows finer control by adjusting the heater operating time depending on the deviation from the setpoint.

Step tests were carried out to analyse the dynamic response of the system. The parameters of the controller were determined on the basis of these tests.

The research results provide an insight into and a comparison of methods for bioreactor temperature control, focussing on the speed at which the setpoint temperature is reached, energy efficiency and system stability.

Keywords

process control, batch reactor, temperature control, two-position control, time-proportional control

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. TEORIJSKI DIO.....	2
2.1. Dvopoložajni i višepoložajni regulatori.....	3
2.2. Vremenski proporcionalna regulacija.....	6
2.3. PID regulatori.....	7
2.4. Metode ugađanja regulatora.....	11
3. EKSPERIMENTALNI DIO	13
3.1. Opis procesa.....	13
3.2. Odziv temperature na skokomičnu promjenu snage grijača	15
3.2.1. Određivanje parametara procesa za ugađanje dvopoložajne regulacije	15
3.2.2. Određivanje parametara procesa za ugađanje vremenski proporcionalne regulacije ..	19
3.3. Određivanje parametara procesa i regulatora.....	21
4. RASPRAVA I ZAKLJUČAK	26
5. LITERATURA.....	29

1. UVOD

Ovo istraživanje obuhvatilo je rad šaržnih reaktora, čije su karakteristike nestacionarnost i odsutnost izmjene tvari s okolinom tijekom odvijanja procesa. ¹

Općenito, šaržni reaktori su primjer "zatvorenih reaktora", odnosno onih koji ne razmijenjuju tvar s okolinom. Konkretno, sustav koji se analizira obuhvaća tri reaktora u kojima se operacije provode zadanim redoslijedom radi dobivanja željene količine i kvalitete proizvoda. ^{2,3}

U šaržnim reaktorima veličine stanja mijenjaju se s vremenom pri čemu je prisutna nekontinuiranost procesa, što znači da se proces završava nakon dobivanja željene kvalitete i zadane količine proizvoda. Prednost u odnosu na kontinuirane procese je ta da njihova nekontinuirana priroda omogućuje fleksibilnost u prilagodbi proizvodnih ciklusa i optimizaciju kvalitete finalnog proizvoda. ²

Za razliku od kontinuiranih procesa, šaržni procesi obuhvaćaju niz međusobno povezanih i vremenski ograničenih faza. Proizvodnja jedne šarže obično uključuje operacije kao što su punjenje, zagrijavanje, kemijske reakcije, miješanje, hlađenje i pražnjenje reaktora. Svaka od tih faza zahtijeva pažljivo vođenje procesnih varijabli, poput brzine kemijskih reakcija, koncentracije produkta, tlaka, protoka medija u plaštu i drugih ključnih veličina. ¹

Regulacija ovih varijabli odvija se putem različitih akcija kao što su otvaranje i zatvaranje ventila, pokretanje i zaustavljanje pumpi, te upravljanje drugim mehaničkim i električnim uređajima. Ključna funkcija regulatora u šaržnim procesima je osigurati stabilnost i učinkovitost sustava, kako u trenucima velikih i naglih promjena procesa, tako i tijekom održavanja stabilnih radnih točaka unutar različitih faza proizvodnog ciklusa. ¹

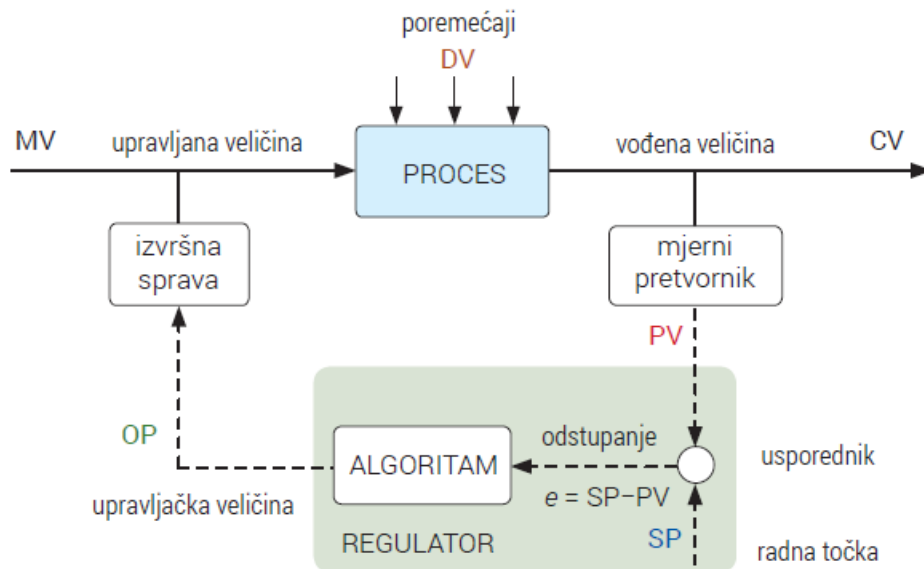
Posebno važna regulacija u šaržnim reaktorima je regulacija temperature. Svaka od vođenih varijabli osjetljiva je na temperaturne promjene, zbog čega se često regulacijski problem svodi na zadatak dobre regulacije temperature. Problem kod regulacije temperature može dovesti do varijacije kvalitete produkata, što može negativno utjecati na ukupnu učinkovitost i isplativost proizvodnog procesa. Tako, stabilna i precizna regulacija temperature postaje ključni faktor za osiguravanje dosljedne kvalitete krajnjih produkata i optimalne proizvodnje. ¹

2. TEORIJSKI DIO

Regulatori, općenito, su kalkulatori posebne namjene koji na temelju signala pogreške iz usporednika računaju potrebne promjene upravljačke veličine. Predstavljaju ključne komponente u svakom sustavu, s osnovnim zadatkom održavanja procesnih varijabli i cijelog procesa na željenim, odnosno optimalnim vrijednostima. Ključna je komponenta upravljačkog sustava koja služi za obradu i prilagodbu upravljačke veličine na temelju signala pogreške dobivenog od usporednika. Njegova osnovna funkcija je izračunati odgovarajuću korekciju upravljačke veličine kako bi se smanjila ili eliminirala razlika između zadane i stvarne vrijednosti kontroliranog parametra. Regulator se sastoji od nekoliko međusobno povezanih dijelova: usporednika, ulaznih i izlaznih elemenata te računске jedinice koja provodi potrebne proračune.¹

Funkcionalnost regulatora može se izraziti kroz tri osnovna tipa djelovanja: proporcionalno (P), integracijsko (I) i derivacijsko (D) djelovanje. Proporcionalno djelovanje odgovara na trenutnu vrijednost pogreške, integracijsko djelovanje temelji se na kumulativnom utjecaju pogreške kroz vrijeme, dok derivacijsko djelovanje reagira na promjenu pogreške u vremenu. Ova tri djelovanja omogućuju regulatoru da precizno i dinamički prilagodi upravljačku veličinu, osiguravajući stabilan i učinkovit rad sustava.¹

Njihovo djelovanje izravno utječe na kvalitetu proizvoda, stabilnost postrojenja, kao i na potrošnju energije i ostalih pomoćnih resursa. Slika 1 prikazuje regulacijski krug kojega čine proces, mjerni pretvornik, regulator i izvršna sprava. Regulator se često smatra uređajem koji obuhvaća kućište i sve unutarnje komponente, no u velikim distribuiranim sustavima regulator je implementiran softverski unutar računalnog sustava. Osim samog regulatora, tu se nalaze i drugi funkcionalni elementi, poput ulaznih elemenata (A/D pretvornik), usporednika, memorije i izlaznih elemenata (D/A pretvornik). Regulateore možemo klasificirati prema izvoru energije koja ih pokreće – elektronički (digitalni), pneumatski, mehanički ili hidraulički. U novije vrijeme, većinom se koriste digitalni regulatori.^{5,6}



Slika 1. Regulator u regulacijskom krugu

Digitalni regulator temelji se na mikroprocesoru, mikrokontroleru ili procesoru digitalnog signala. Regulatori mogu biti kontinuirani ili diskontinuirani. Svi digitalni regulatori su u suštini diskontinuirani regulatori, ali u praksi pod diskontinuiranim regulatorom smatra se „dvopoložajni“ ili „višepoložajni“ regulator.

2.1. Dvopoložajni i višepoložajni regulatori

Dvopoložajni regulator najjednostavniji je regulator temperature te je jedan od najčešćih regulatora i u industriji i u kućanstvu. Većina kućnih sustava grijanja i bojlera radi sa dvopoložajnim regulatorom. Izlaz je aktivan kada je temperatura ispod zadane vrijednosti, a isključen kada je iznad zadane vrijednosti.⁵

Budući da temperatura mora preći zadanu vrijednost da bi se promijenilo stanje izlaza iz regulatora, temperatura će kontinuirano oscilirati oko zadane vrijednosti. U slučajevima kada se ova promjena zbiva u kratkim intervalima da bi se spriječilo oštećenje kontaktnih elemenata i ventila, u algoritam regulatora dodaje se mrtvi pojas (engl. *dead band* ili *dead zone*), što je značajka prisutna u mnogim

kontrolnim sustavima, uključujući regulaciju temperature. Omogućuje da temperatura mora odstupiti od zadane vrijednosti za određeni iznos prije nego što regulator izvrši promjenu, smanjujući tako broj prebacivanja između uključenja i isključenja. Ova funkcija smanjuje oscilacije temperature i sprječava prečesto aktiviranje elemenata kao što su kontaktori i ventili, čime se produžuje njihov vijek trajanja. ⁸

Sustavi s dvopoložajnim (on/off) regulatorima, poput onih koji se koriste za regulaciju temperature, često imaju problema s konstantnim oscilacijama oko zadane vrijednosti kad nema "mrtvog pojasa" (engl. *dead band* ili *dead zone*). Bez mrtvog pojasa, sustavi se često uključuju i isključuju, što može uzrokovati trošenje opreme i otežati održavanje stabilnih uvjeta. Uvođenje mrtvog pojasa stvara toleranciju u kojoj male promjene temperature oko zadane vrijednosti ne uzrokuju trenutačnu reakciju regulatora, čime se poboljšava stabilnost sustava i smanjuje mehanički stres na opremu. ^{8,9}

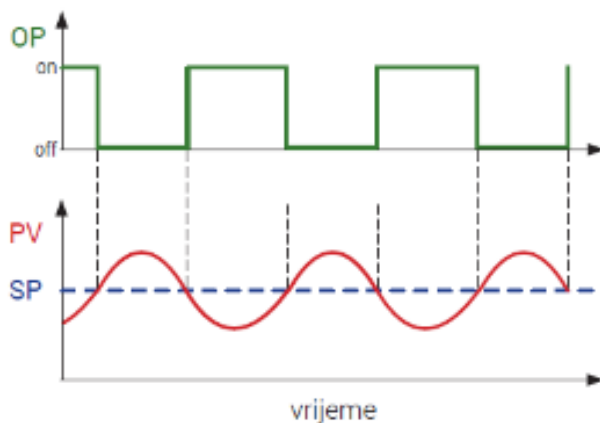
Kod ovih sustava, mrtvi pojas zahtijeva da temperatura odstupi od zadane vrijednosti za određeni iznos prije nego što regulator reagira uključivanjem ili isključivanjem. Ovaj mehanizam smanjuje učestalost prebacivanja, stabilizira proces te povećava energetska učinkovitost i produžuje vijek trajanja mehaničkih komponenti poput ventila i aktuatora. ^{8,9}

Kod dvopoložajne regulacije upravljačka varijabla poprima ili maksimalnu ili minimalnu vrijednost, ovisno o tome je li vođena varijabla ispod ili iznad radne točke, odnosno u okolini radne točke. Minimalna vrijednost upravljačke varijable obično je nula. Ovaj regulator isključuje izlaz tek kada temperatura premaši zadanu vrijednost, dok je za regulaciju grijanja izlaz uključen kada temperatura padne ispod te vrijednosti. Kako temperatura mora preći zadanu granicu da bi došlo do promjene stanja izlaza, procesna temperatura će kontinuirano oscilirati. Mehanizam rada dvopoložajnog regulatora u načelu je jednostavni relejski mehanizam. Dvopoložajna regulacija obično se koristi u situacijama kada nije potrebna visoka preciznost u kontroli, odnosno kada nije nužno održavati stabilne i čvrste uvjete regulacije. Ova metoda regulacije primjenjuje se u procesima gdje je nepraktično ili nemoguće kontinuirano mijenjati energetska tok, kao i u sustavima s velikom akumulacijom topline, gdje se temperature mijenjaju vrlo sporo. Zbog tih karakteristika, dvopoložajna regulacija je idealna za jednostavnije sustave u kojima oscilacije temperature ne predstavljaju ozbiljan problem.

Osim toga, dvopoložajni regulator aktivira se i u slučaju kada dođe do temperaturnog alarma, pružajući dodatnu sigurnosnu funkciju. U takvim situacijama, regulator ima relej za isključenje koji prekida napajanje, čime se zaustavlja grijanje kada temperatura premaši određeni sigurnosni limit. Nakon toga, relej se mora ručno "resetirati" kako bi se sustav ponovno pokrenuo, što osigurava kontrolu nad procesom i sprječava potencijalna oštećenja ili pregrijavanje. Ova metoda regulacije česta je u sustavima gdje sigurnosni prekidi i pouzdano upravljanje temperaturom igraju ključnu ulogu.

U praksi ne postoji uređaj koji je osjetljiv na vrlo mala odstupanja, niti se takav želi primjenjivati. Preciznost dvopoložajnog regulatora uvelike ovisi o kvaliteti senzora. Senzoru je uvijek potrebno određeno vrijeme da registira promjenu, u ovom slučaju temperature, kao i da prenese prikupljene informacije na obradu. Što je senzor kvalitetniji, brže i točnije detektira promjene, što rezultira preciznijim i učinkovitijim upravljanjem. Vrlo osjetljiv regulator koji bi učestalo preklapao iz jednog u drugi položaj troši pomične dijelove i kontakte te unosi nestabilnost. Rješenje kod komercijalnih regulatora je postavljanje mrtve zone na otprilike 0,5 % do 2 % cjelokupnog područja.⁵

Na slici 2 prikazana je dvopoložajna regulacija (bez mrtve zone) kako bi izgledala kod kućnog sustava za grijanje.⁵



Slika 2. Dvopoložajna regulacija sustava za grijanje

Uređaji koji se primjenjuju za dvopoložajnu regulaciju su jednostavni, robusni i jeftini. Za dvopoložajni regulator svojstveno je oscilacijsko vladanje. Kod određenih sustava amplituda oscilacije vođene veličine dovoljno je mala. ⁵

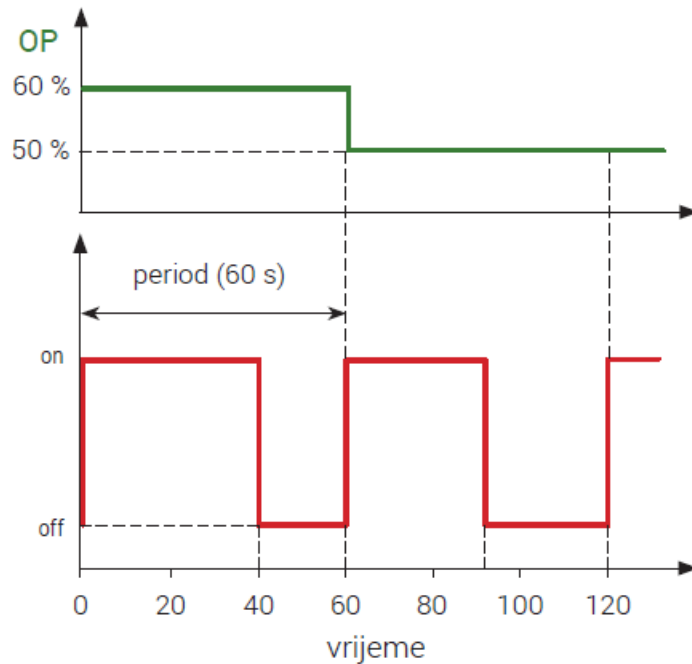
2.2. Vremenski proporcionalna regulacija

Vremenski proporcionalna regulacija (engl. *time-proportional control*) tehnika je modulacije širine impulsa (engl. *pulse-width modulation - PWM*) kojom se provodi kontinuirana regulacija (0 – 100 % izlaza) kad se upravlja diskretnim (dvopoložajnim) izvršnim elementom. U tom slučaju aktuator treba uključiti i isključiti u vremenskom omjeru koji je proporcionalan izlaznom kontinuiranom upravljačkom signalu. ¹⁰

Ova metoda upravlja izlaznom veličinom u vremenskim intervalima. Često se primjenjuje u regulaciji temperature, brzine ili protoka, gdje se uređaji, poput grijača, uključuju i isključuju ovisno o odstupanju trenutne vrijednosti od željene. U sustavima za grijanje, trajanje uključivanja grijača ovisi o tome koliko je trenutna temperatura udaljena od zadane. Kada se kombinira s PID regulatorima, povećava se preciznost, a oscilacije se smanjuju. ^{11,12}

Tako npr. s vremenskom proporcionalnom regulacijom kućni termostat nema potrebe za kontinuiranim upravljanjem (koje bi bilo znatno skuplje). Kod klimatizacijskog uređaja se ne regulira količina hladnog zraka koji se ispušta u prostoriju, već trajanje svakog ispusta. Da bi se postigao X % izlaza regulatora termostat će uključiti uređaj na X % vremena, a zatim isključiti na Y % vremena pri čemu vrijedi $X [\%] + Y [\%] = 100 [\%]$. Drugim riječima, ukupni period dijeli se proporcionalno na period kad djeluje izlazni signal od 0 % i period kad djeluje 100 %:

Ako su periodi uključivanja i isključivanja mali u usporedbi s vremenom koje je potrebno za hlađenje prostorije (više minuta), tada će prosječni učinak uključivanja klimatizacijskog uređaja tijekom X % vremena biti sličan radu klima uređaja na X % punog kapaciteta kontinuirano. Kratkoročno će sobna temperatura i dalje oscilirati oko zadane vrijednosti, ali obično manje u usporedbi s dvopoložajnom regulacijom. Fluktuacija temperatura se uvijek može reducirati smanjivanjem perioda između "uključivanja" i "isključivanja", odnosno radnog ciklusa regulatora.



Slika 3. Vremenski proporcionalan regulator s periodom od 60 s (1 min)

Vremenski proporcionalna regulacija posebno je prikladna za procese koji su relativno spori i kod kojih dvopoložajna regulacija ne uzrokuje značajne oscilacije. Ova metoda često se koristi za kontrolu temperature u kućnim bojlerima i prostorijama, gdje preciznost nije ključna, ali stabilnost sustava ostaje važna. U industrijskim procesima vremenski proporcionalna regulacija primjenjuje se u kontroliranju razine i tlaka u velikim spremnicima ili sustavima, gdje bi ugradnja sofisticiranijih i kontinuiranih upravljačkih uređaja bila preskupa. Ova metoda pruža ekonomično i jednostavno rješenje za regulaciju u sustavima s velikim kapacitetom, gdje je odziv procesa dovoljno spor da omogućava učinkovit rad s minimalnim oscilacijama.¹⁰

2.3. PID regulatori

PID (proporcionalno-integracijsko-derivacijski) regulatori su jedni od najvažnijih alata u industrijskoj automatizaciji, omogućujući preciznu kontrolu različitih procesnih varijabli poput temperature, brzine i tlaka. Njihova funkcija temelji se na tri ključna elementa: proporcionalni dio koji odgovara na trenutnu pogrešku, integracijski koji akumulira pogreške tijekom vremena i derivacijski koji predviđa buduće promjene.

Proporcionalno djelovanje

Proporcionalno djelovanje predstavlja temeljnu funkciju svakog regulatora i aktivira se kao odgovor na promjenu radne točke (*SP*), promjenu tereta ili pojavu poremećaja (*DV*) unutar procesa. Ovaj tip regulacije karakteriziran je proporcionalnom konstantom, poznatom i kao pojačanje (K_c), koja određuje kako će regulator reagirati na odstupanja vođene varijable od zadane vrijednosti. Cilj proporcionalnog djelovanja je održavanje vođene varijable unutar prihvatljivog raspona oko radne točke, osiguravajući stabilnost sustava.¹

Regulator koji koristi isključivo proporcionalno djelovanje naziva se proporcionalnim regulatorom ili P regulatorom. Njegova funkcija temelji se na jednostavnom principu proporcionalnosti, gdje je izlaz regulatora izravno proporcionalan veličini pogreške, odnosno odstupanju vođene varijable od zadane vrijednosti. Algoritam proporcionalnog regulatora glasi:

$$OP = K_c \cdot e \quad (1)$$

P regulator karakterizira brz i stabilan odziv, ali uz prisutnost preostalog regulacijskog odstupanja (engl. *offset*), koje se odnosi na stalno odstupanje vođene varijable od zadane radne točke. Ovo odstupanje javlja se kada se koristi regulator isključivo s proporcionalnim djelovanjem, budući da takav regulator ne može potpuno eliminirati pogrešku u stabilnom stanju. P regulator, premda jednostavan, ima ograničenja jer ne može u potpunosti eliminirati pogrešku u stabilnom stanju, ali je izuzetno koristan za mnoge sustave gdje je dovoljna osnovna kontrola i brz odziv na promjene u procesu. Proporcionalno djelovanje često se kombinira s drugim metodama, poput integracijskog i derivacijskog djelovanja, kako bi se postigla preciznija i stabilnija regulacija u složenijim sustavima.¹

Integracijsko djelovanje

Integracijsko djelovanje, često poznato i kao "reset djelovanje", predstavlja postupak u kojem se izlaz iz regulatora (*OP*) mijenja u skladu s integralom pogreške tijekom vremena. Temeljna karakteristika ovog djelovanja je integracijsko vrijeme (τ_i), koje definira brzinu reakcije regulatora na akumulirane pogreške. Glavna svrha integracijskog djelovanja je kompenziranje dugotrajnih poremećaja te uklanjanje preostalog regulacijskog odstupanja, poznatog i kao "offset" u

engleskom jeziku. Ovaj mehanizam osigurava da se, s vremenom, odstupanje između željene i stvarne vrijednosti minimizira.^{1,5}

U praksi, integracijsko djelovanje se često koristi zajedno s proporcionalnim djelovanjem (P regulator), pri čemu ova kombinacija tvori proporcionalno-integracijski regulator, ili PI regulator. Takav regulator omogućuje ne samo trenutni odgovor na pogrešku (proporcionalno djelovanje), već i prilagodbu na dulje vremensko odstupanje (integracijsko djelovanje), čime se postiže stabilniji i precizniji sustav regulacije.^{1,5} Algoritam PI regulatora može se izraziti matematički, a koristi se u raznim industrijskim primjenama gdje je potrebna precizna kontrola procesa:

$$OP = K_c \cdot \left[e \frac{1}{\tau_i} \cdot \int edt \right] \quad (2)$$

Derivacijsko djelovanje

Derivacijsko djelovanje mijenja izlaznu veličinu regulatora (*OP*) ovisno o brzini promjene vođene varijable. Ključna karakteristika ovog djelovanja je derivacijsko vrijeme τ_d , koje određuje koliko će regulator reagirati na brzinu promjene pogreške. Dodavanjem derivacijskog djelovanja u regulator unosi se element prethođenja (engl. *lead*), što pomaže u kompenzaciji vremenske zadržke (engl. *lag*) u procesu. Zbog ove sposobnosti, derivacijsko djelovanje posebno je korisno u regulaciji procesa s velikom vremenskom zadržkom i sporim odzivom, kao što je regulacija temperature u spremnicima ili reaktorima.^{1,5}

Ovo djelovanje je proporcionalno brzini promjene signala pogreške, što znači da pomaže regulatoru da brzo reagira na promjene u procesu prije nego što pogreška postane prevelika. Međutim, derivacijsko djelovanje se ne preporučuje u sustavima s visokim razinama mjernog šuma, kao što su regulacija razine ili protoka. U takvim slučajevima, preosjetljivost na šum može dovesti do naglih i čestih promjena u položaju ventila, što rezultira povećanom istrošenošću i skraćenim vijekom trajanja ventila.^{1,5}

U praksi se derivacijsko djelovanje često kombinira s proporcionalnim djelovanjem, što rezultira PD regulatorom, koji omogućuje bržu reakciju na promjene i bolju kontrolu procesa.^{1,5} Algoritam PD regulatora glasi:

$$OP = Kc \cdot \left[e + \tau_d \frac{de}{dt} \right] \quad (3)$$

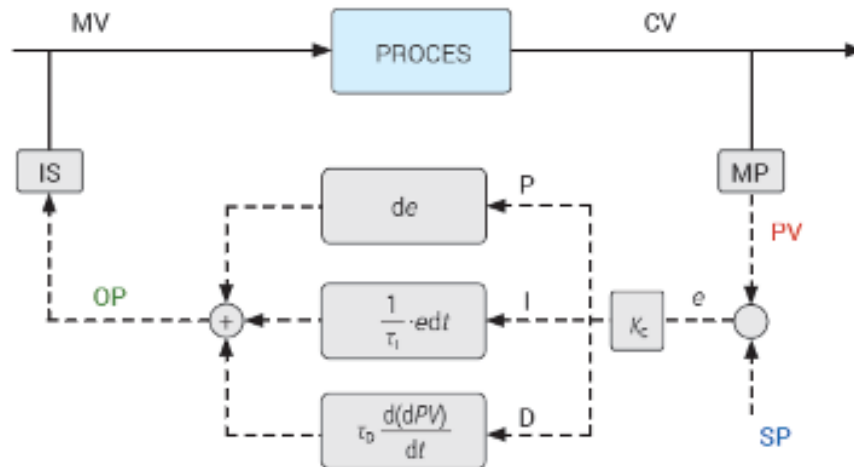
PID regulator

Proporcionalno-integralno-derivacijski (PID) regulator, objedinjuje sva tri osnovna regulacijska djelovanja: proporcionalno, integracijsko i derivacijsko. Ovaj regulator osigurava brz i precizan odziv sustava, eliminirajući preostalo regulacijsko odstupanje (engl. *offset*), što ga čini vrlo učinkovitim u širokom rasponu primjena. Unatoč njegovim prednostima, jedan od glavnih nedostataka PID regulatora je njegova složenost prilikom ugađanja. Za postizanje optimalnih performansi, nužno je pravilno podesiti tri ključna parametra: proporcionalni (P), integracijski (I) i derivacijski (D) koeficijent, što može biti izazovno.^{1,5}

Ova kombinacija omogućuje postizanje stabilne kontrole unatoč smetnjama u sustavu. PID regulatori često se koriste u povratnim sustavima vođenja kako bi osigurali stabilnost i preciznost procesa.⁵ Algoritam ovog regulatora glasi:

$$OP = K_c \left(e + \frac{1}{\tau_i} \int e dt + \tau_d \frac{de}{dt} \right) \quad (4)$$

Ovaj regulator ima brz odziv i uklanja preostalo regulacijsko odstupanje, ali je najzahtjevniji za ugađanje. No, kada je pravilno ugađen, PID regulator nudi vrhunsku kontrolu nad sporim procesima, kao što su toplinski procesi, gdje se regulira temperatura ili koncentracija. Zbog svoje fleksibilnosti, može se prilagoditi raznim industrijskim aplikacijama. Važno je napomenuti da se pojačanje regulatora, K_c , primjenjuje na sve tri komponente (proporcionalnu, integracijsku i derivacijsku), što omogućuje precizniju kontrolu i stabilnost sustava. slika 4.⁵



Slika 4. Proporcionalno-integracijsko-derivacijski (PID) regulator

2.4. Metode ugađanja regulatora

Regulator treba ugoditi za stabilan rad i planiranu strategiju vođenja jer je dobro ugođeni regulator ključan za optimalan rad regulacijskog kruga i procesa. Ukoliko nije dobro ugođen regulator će uzrokovati nestabilnosti u procesu, manju kvalitetu poluproizvoda i proizvoda, povećani trošak energije i pomoćnih medija, prekid rada, dulje vrijeme potrebno za pokretanje postrojenja, kao i veće troškove održavanja. Sukladno tome, postoji dovoljno razloga zašto ugađati regulatore, a time i optimirati djelovanje procesa i cijelog postrojenja.⁵

Da bi analizirali proces i ugodili regulacijski krug ključno je poznavati statičko i dinamičko vladanje procesa. Dinamičko vladanje procesa razlikuje se od procesa do procesa, čak i kod funkcijski veoma sličnih regulacijskih krugova. U svrhu ugađanja, proces i regulacijski krug opisuju se pojednostavljenim modelima procesa koji definiraju osnovne karakteristike procesa, a to su modeli I. reda s mrtvim vremenom, modeli II. reda s mrtvim vremenom i modeli integratora s mrtvim vremenom. S druge, pak, strane parametri regulatora koje treba odrediti pri ugađanju regulatora su: pojačanje regulatora K_c integracijsko vrijeme τ_i , derivacijsko vrijeme τ_d .⁵

Dobro ugođeni regulacijski krug treba imati brzi odziv na poremećaj ili promjenu radne točke, a da pri tome, uz stabilnost ima što manji prebačaj. Brzim odzivom regulacijski krug kompenzira

poremećaje u kratkom vremenu, zbog čega se smanjuju stabilnost i robusnost regulacijskog kruga i obratno.⁵

Pri ugađanju regulatora primjenjuje se jedan od metoda ugađanja shodno odzivu koji se želi ostvariti. Najjednostavnija metoda je metoda pokušaja i pogreške (engl. *trial and error*), u kojoj se ručno mijenjaju vrijednosti pojedinih parametara regulatora te se gleda učinak na regulacijski krug. Ovakva metoda je prikladna za jednostavne sustave s brzim odzivom. Međutim, ako je krug trom, proporcionalno djelovanje se povećava, a integracijsko i derivacijsko vrijeme se smanjuju. Pri pojavi oscilacija i prebačaja proporcionalno djelovanje se smanjuje, a integracijsko i derivacijsko vrijeme povećavaju. Pošto se svaka vrijednost parametra mora individualno podešavati te promatrati utjecaj na regulacijski krug, ovakva metoda je izrazito spora.

J.G. Ziegler i N.B. Nichols razvili su metodu kritične oscilacije (engl. *ultimate-cycling method*) u kojoj se zatvoreni regulacijski krug dovodi do oscilacije, pri čemu se na osnovi perioda i amplitude oscilacije određuju parametri regulatora. Metoda se preporuča za krugove s brzim dinamikom.

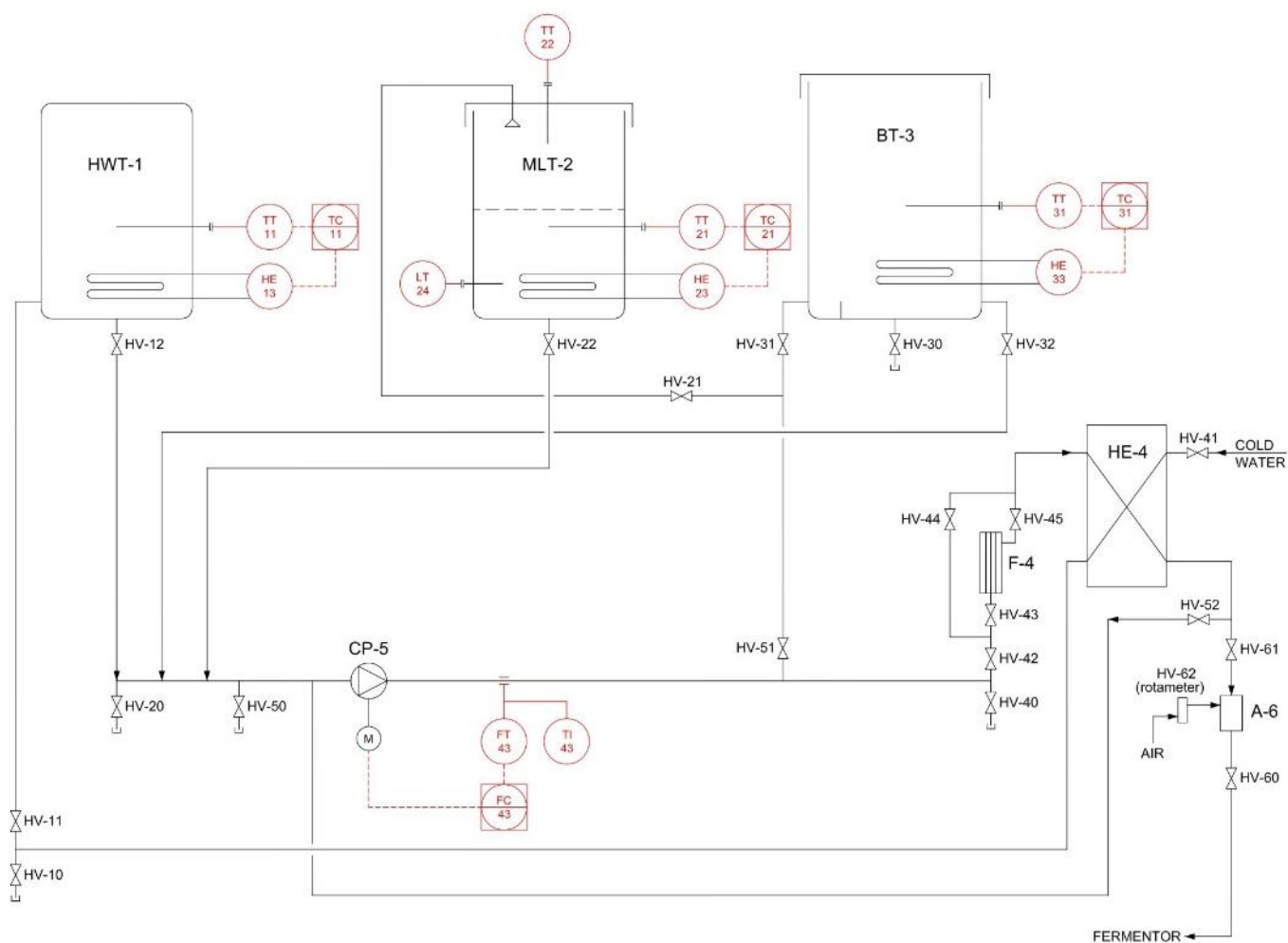
Lambda i IMC (engl. *Internal Model Control*) metoda se primjenjuje samo za PI regulatore u samoregulirajućim procesima s izraženom zadržkom, sporim odzivom i velikim interakcijama. Na osnovi određenih dinamičkih i statičkih parametara procesa; statičke osjetljivosti, mrtvog vremena i vremenske konstante definira se željena karakteristika odziva kruga na temelju promjene radne točke.

Pomoću Lambda metode moguće je specificirati željenu brzinu odziva (vremensku konstantu zatvorenog kruga). Metoda je puno manje osjetljiva na moguće pogreške pri određivanju mrtvog vremena. Ako proces ima veliku vremensku konstantu, regulator će imati veliko integracijsko vrijeme, što znači vrlo spori povratak nakon poremećaja.

3. EKSPERIMENTALNI DIO

U nastavku rada opisan je proces za pripremu sladovine u pivarskoj industriji prije procesa fermentacije. Prikazan je P&I dijagram procesa sa mjernim pretvornicima i sensorima, kao i regulacijskim krugovima.

3.1. Opis procesa



Slika 5. P&ID bioreaktor

Legenda:

HWT-1 - spremnik tople vode; **CP-5** - centrifugalna pumpa; **MLT-2** - spremnik za ukomljavanje;
BT-3 - spremnik za vrenje; **F-4** - filtar; **HE-4** - izmjenjivač topline; **A-6** - aerator

Voda ulazi u spremnik tople vode, HWT-1, kroz ventil na zidu HV-41, prolazi kroz izmjenjivač HE-4 i ulazi u spremnik tople vode HWT-1 kroz ventil HV-11. U spremniku HW-1 voda se zagrijava do približno 50 °C regulatorom TC-11. Zagrijana voda prolazi kroz ventil HV-12, prolazi kroz pumpu CP-5 i ventil HV-51 koji ju usmjerava u spremnik za ukomljavanje, MLT-2 i spremnik za vrenje, BT-3. Ventil HV-21 usmjerava tok u spremnik MLT-2. U spremniku MLT-2 dodaje se slad u stalni tok kapljevine. Smjesa se u spremniku MLT-2 grije regulatorom TC-21 na približno 70 °C. Grijalo se prvi puta uključuje kad LT-24 pošalje signal da je minimalna razina zadovoljena prilikom čega je potrebno softverski ugraditi kašnjenje, *delay*. Nakon što se spremnik ispuni otvara se ventil HV-22 na dnu spremnika MLT-2, a sladovina koja protječe kroz sito odvodi se centrifugalnom pumpom CP-5 i vraća na vrh posude spremnika MLT-2 gdje se jednoliko se raspršujući po filtarskom kolaču. Nakon postizanja željena koncentracija šećera u sladovini, zatvara se ventil HV-21 i otvara se ventil HV-31 prema spremniku BT-3. Sladovina se u spremniku BT-3 regulatorom TC-31 grije do vrenja. Kada se sladovina ohladi na 70°C dodaje se hmelj te dolazi do otvaranja bočnog ventil HV-32 pri dnu posude BT-3 i pumpom CP-5 sladovina se usmjerava na *whirlpool* BT-3 gdje ulazi tangencijalno čime se stvara vrtlog. Nakon što se izmjeri željena količina alfa i beta kiselina (postigne željena gorčina), sladovina se pomoću pumpe CP-5 usmjerava na filter F-6 zatvaranjem ventila HV-51 i HV-42, pa zatim prolazi kroz izmjenjivač HE-4. U slučaju filtriranja otvoreni su ventili HV-43 i HV-45, a u slučaju zaobilazanja otvara se *bypass* ventil HV-44, a HV-43 i HV-45 se zatvaraju. Protok sladovine se regulira kako bi se protustrujnim hlađenjem osigurala željena temperatura sladovine na izlazu iz HE-4. U slučaju nedostizanja temperature moguće je ostvariti recirkulaciju otvaranjem ventila HV-52. Ohlađena sladovina se aerira. Otvara se ventil HV-61, a protok zraka podešava se s malim ventilom HV-62 na rotametu. Po mogućnosti mjeri se koncentracija otopljenog kisika. Aerirana sladovina odlazi otvaranjem ventila HV-60 u prethodno pripremljeni fermentor FT-7 u kojem je dodan kvasac. Hladi se na zadanu temperaturu regulatorom ugrađenim u fermentor dok se u fermentoru se prati koncentracija etanola.



Slika 6. Fotografija laboratorijskog postrojenja

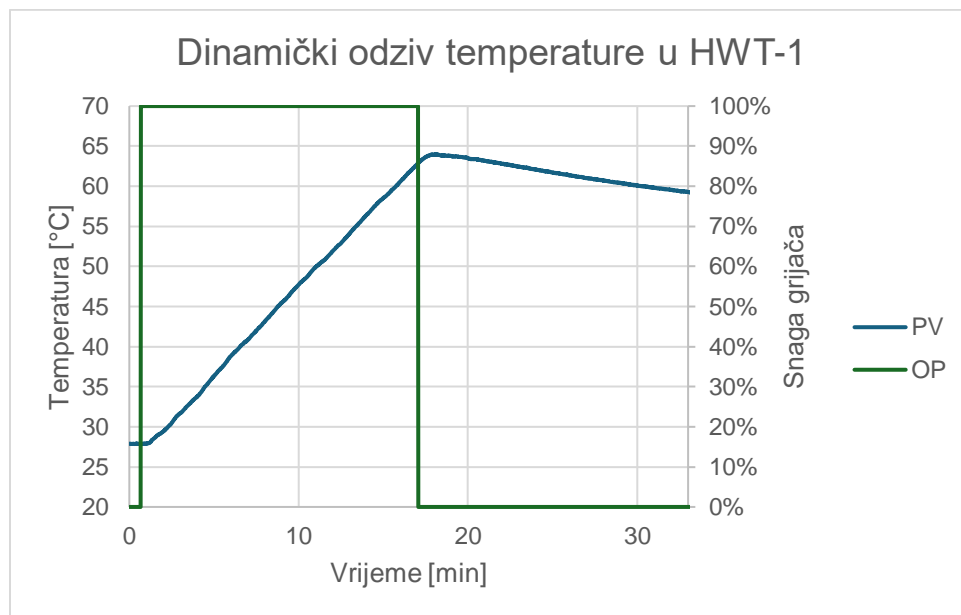
3.2. Odziv temperature na skokomičnu promjenu snage grijala

3.2.1. Određivanje parametara procesa

U nastavku rada analiziran je dinamički odziv temperature u tri šaržna reaktora s ciljem određivanja parametara potrebnih za ugađanje regulatora. Istraživanje je provedeno kako bi se odredio dinamičko odziv temperature unutar reaktora kao odziv na skokomičnu promjenu snage grijala. Ispitivanje je provedeno u spremniku tople vode **HWT-10** te reaktorima **MLT-20** i **BT-30**:

- Kako je vidljivo na slici 7 spremnik HWT-10 je prethodno ispunjen vodom, stoga je ispitivanje počelo od sobne temperatura vode prije grijanja kada je snaga grijala trenutno povećana do 100 % (skokomična promjena);
- U reaktoru MLT-20 mjerenje je započeto kada je reaktor bio prazan na sobnoj temperaturi. U reaktor se dodavala voda predgrijana u reaktoru HWT-10. Snaga grijala se promijenila skokomično, što je vidljivo na slici 8;
- Kako prikazuje slika 9 u reaktoru BT-30 početna temperatura bila je 41°C jer se voda nakon grijanja u reaktoru MLT-20 hladila prije dodavanja u reaktor.

Tijekom eksperimenta praćena je promjena temperature vode u svakom reaktoru kako bi se dobio dinamički odziv temperature na promjenu snage grijala. Reaktor HWT-10 pratio se do temperature 64°C, MLT-20 do 84°C, a BT-30 do 100°C. Podaci su prikupljeni pomoću senzora i mjernog pretvornika temperature uronjenih u svaki od reaktora. Snaga grijala upravljana je pomoću regulatora, a temperatura je kontinuirano bilježena. Podaci su analizirani i prikazani u obliku grafova koji prikazuju promjene temperature (procesna varijabla - *PV*) u funkciji vremena, uz prikaz promjene snage grijala (engl. *output* - *OP*).



Slika 7. Dinamički odziv temperature u spremniku tople vode HWT-10

Na slici 7 vidljivo je kako temperatura raste do 64 °C. Nakon isključivanja grijala temperatura raste za još približno 2 °C. Riječ je o integrirajućem obliku odziva procesa. To možemo zaključiti

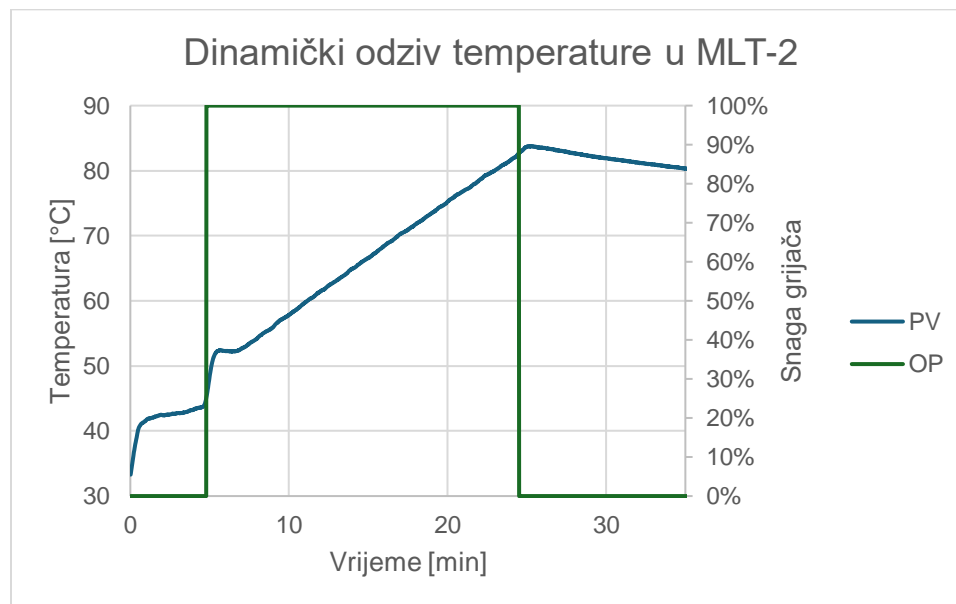
jer se temperatura ne može ustaliti. Za ovaj tip procesa potrebno je odrediti mrtvo vrijeme i integracijsku brzinu. Mrtvo vrijeme (engl. *dead time, time delay*) je vrijeme koje je potrebno da bi krenula promjena izlazne veličine nakon što je došlo do promjene ulazne veličine procesa, dok je integracijska brzina promjene izlazne veličine u periodu kada se proces kreće prema zadanoj vrijednosti. Nakon promjene snage grijala (OP) temperatura (PV) počinje rasti. Mrtvo vrijeme računa se kao razlika od promjene snage grijala do početka rasta temperature:

$$\theta = T_2 - T_1 = 150 \text{ s} - 100 \text{ s} = 50 \text{ s} \quad (5)$$

pri čemu T_1 označava trenutak kad se grijalo uključilo, a T_2 trenutak kad započinje temperaturni odziv.

Integracijska brzina računa se prema izrazu:

$$r_{int} = \text{nagib} = \frac{\text{prirast temperature}}{\text{promjena snage grijala}} = \frac{\frac{\Delta PV}{\Delta t}}{\Delta OP} = \frac{\frac{64^\circ\text{C} - 28^\circ\text{C}}{16,67 \text{ min} - 1,67 \text{ min}}}{100 - 0 \%} = 0,024^\circ\text{C}/\text{min} \% \quad (6)$$



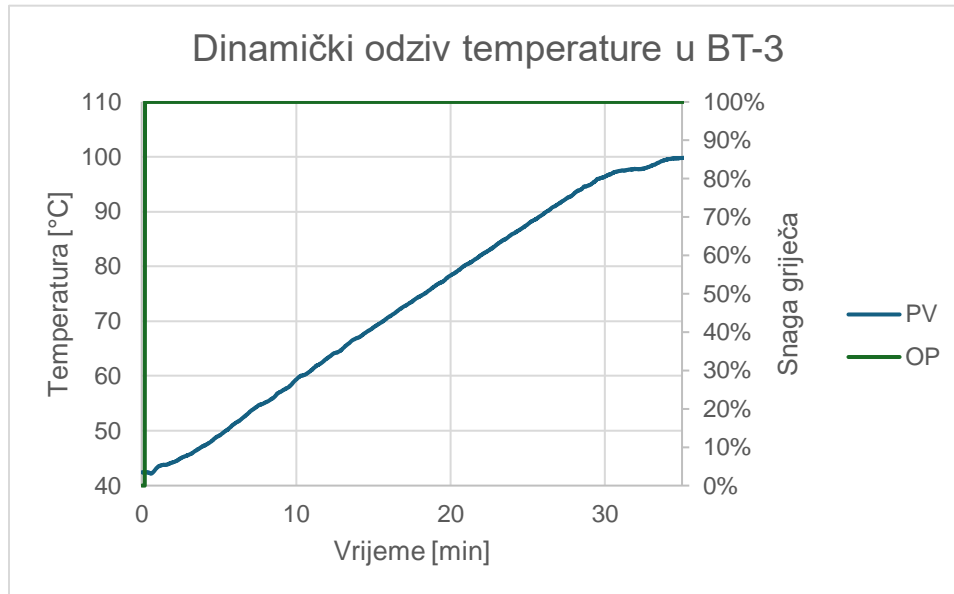
Slika 8. Dinamički odziv temperature u MLT-20

Graf prikazuje odziv temperature u reaktoru MLT-20. Kada je grijalo na 0 %, početni rast temperature vode posljedica je akumulacije vode u spremniku iz prethodnog stupnja procesa. Temperatura dostiže 84 °C. Mrtvo vrijeme procijenjeno je:

$$\theta = T_2 - T_1 = 250 \text{ s} - 250 \text{ s} = 0 \text{ s} \quad (7)$$

Integracijsku brzinu izračunali smo prema izrazu:

$$r_{int} = nagib = \frac{PVprirast}{OPpromjena} = \frac{\frac{\Delta PV}{\Delta t}}{\Delta OP} = \frac{\frac{84\text{ }^{\circ}\text{C} - 45\text{ }^{\circ}\text{C}}{25\text{ min} - 4,167\text{ min}}}{100\% - 0\%} = 0,0187\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}\% \quad (8)$$



Slika 9. Dinamički odziv temperature u BT-30

Na slici 9 prikazuje se dinamički odziv temperature u reaktoru BT-30. Temperatura se postepeno povećavala do otprilike 100 °C, nakon čega se stabilizirala. Nakon promjene snage grijala s 0 na 100 %, temperatura počinje rasti. Mrtvo vrijeme procijenjujemo kao razliku između ova dva trenutka.

$$\theta = T_2 - T_1 = 30s - 0s = 30s \quad (9)$$

Integrirajuću brzinu izračunali smo prema izrazu:

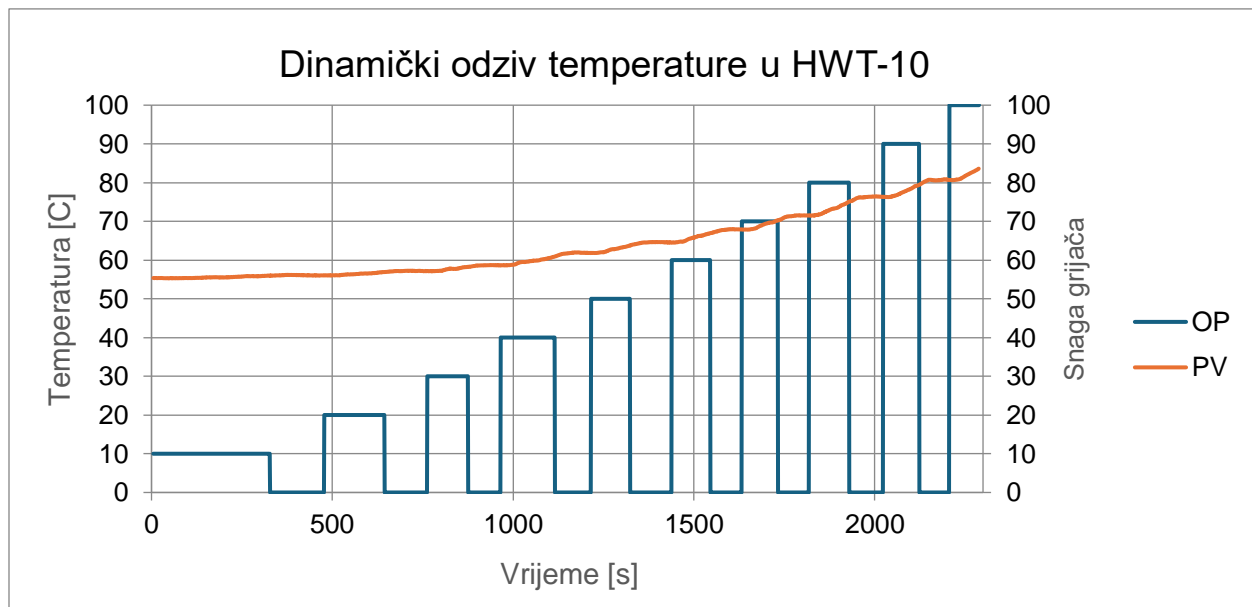
$$r_{int} = nagib = \frac{PVprirast}{OPpromjena} = \frac{\frac{\Delta PV}{\Delta t}}{\Delta OP} = \frac{\frac{110\text{ }^{\circ}\text{C} - 42\text{ }^{\circ}\text{C}}{37,5\text{ min} - 0\text{ min}}}{100\% - 0\%} = 0,0181\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}\% \quad (10)$$

Reaktor BT-30 stabilizirao se na temperaturi vrenja 100 °C. Spremnik tople vode HTW – 10, bez miješanja ima najveće mrtvo vrijeme, reaktor s recirkulacijom, MLT – 20 ima najmanje, a reaktor

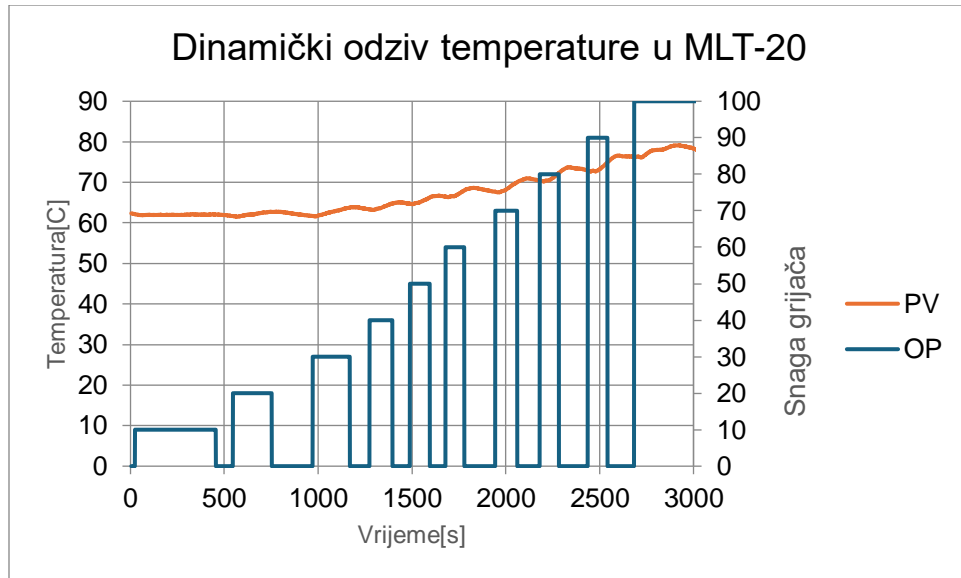
s miješanjem, BT – 10 ima manje od prvog, ali veće od drugog. Integracijske brzine od 0,024 °C/min % za spremnik tople vode HTW-10, 0,0187 °C/min % za reaktor MLT-20 i 0,0181 °C/min % za reaktor BT-30 ukazuju na sličnu dinamiku zagrijavanja unutar svakog reaktora što proizlazi iz jednakih snaga grijala i dimenzija posuda.

3.2.2. Određivanje parametara za ugađanje vremenski proporcionalne regulacije

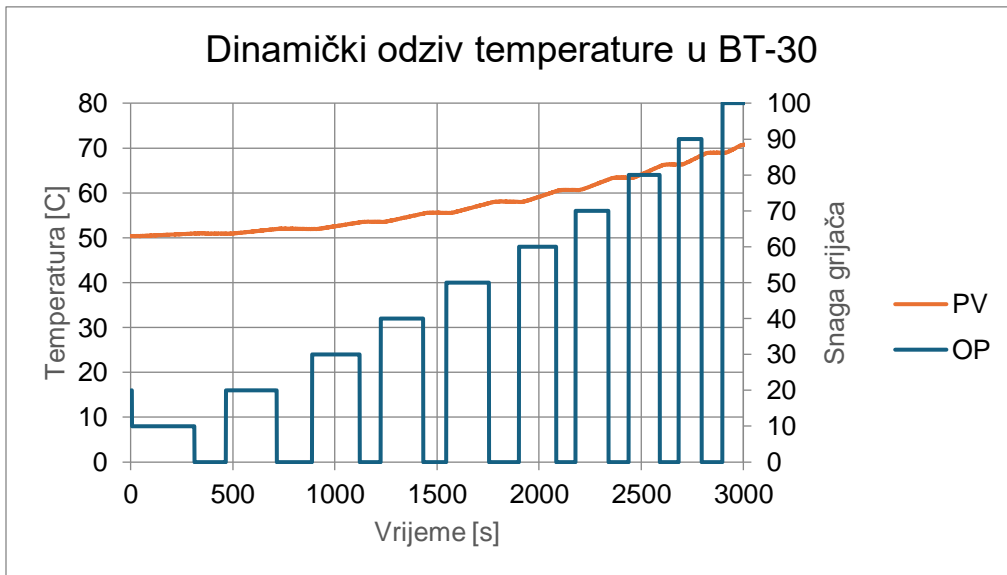
Na sljedećim grafovima prikazana je vremenski proporcionalna regulacija pri čemu se skokomično mijenjala snaga grijala. Pratio se odziv temperature (PV) koja je postupno rasla s porastom snage grijala (OP).



Slika 10. Dinamički odziv temperature u HWT – 10



Slika 11. Dinamički odziv temperature u MLT-20



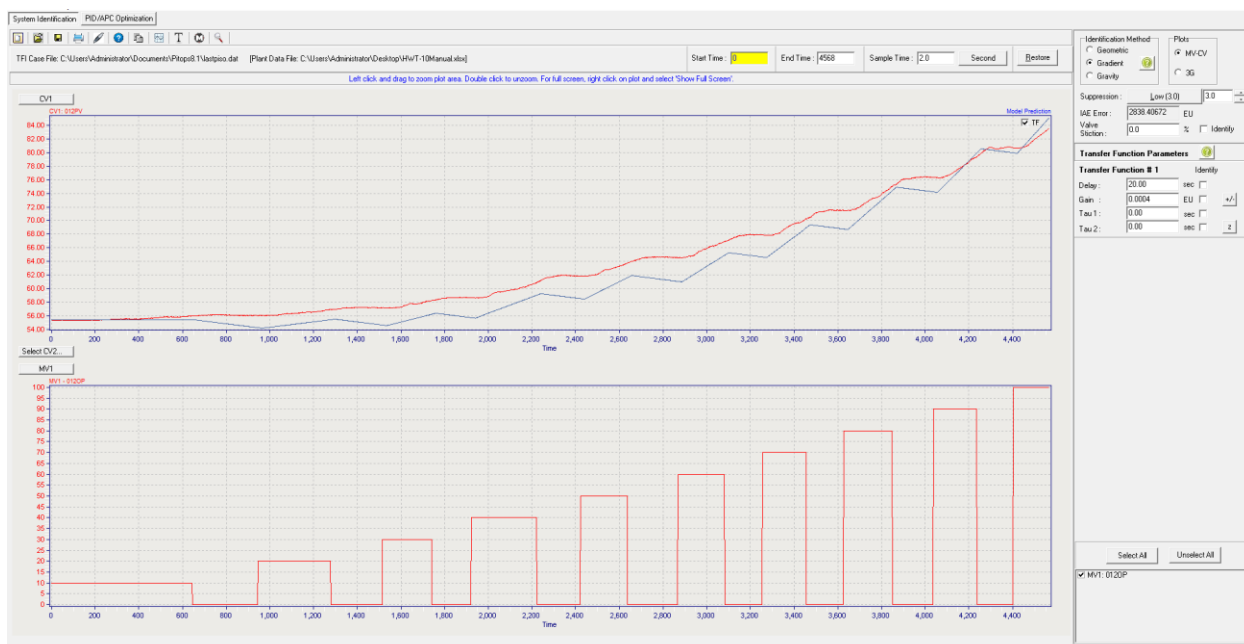
Slika 12. Dinamički odziv temperature u BT-30

Na slikama 10., 11., i 12. prikazani su grafovi dinamičkog odziva temperature iz kojih možemo zaključiti kako se povećanjem *OP* povećava i nagib krivulje odziva temperature, što znači da povećanjem *OP* raste i integracijska brzina procesa. To nam omogućava finiju regulaciju procesa u usporedbi s klasičnom dvopoložajnom regulacijom.

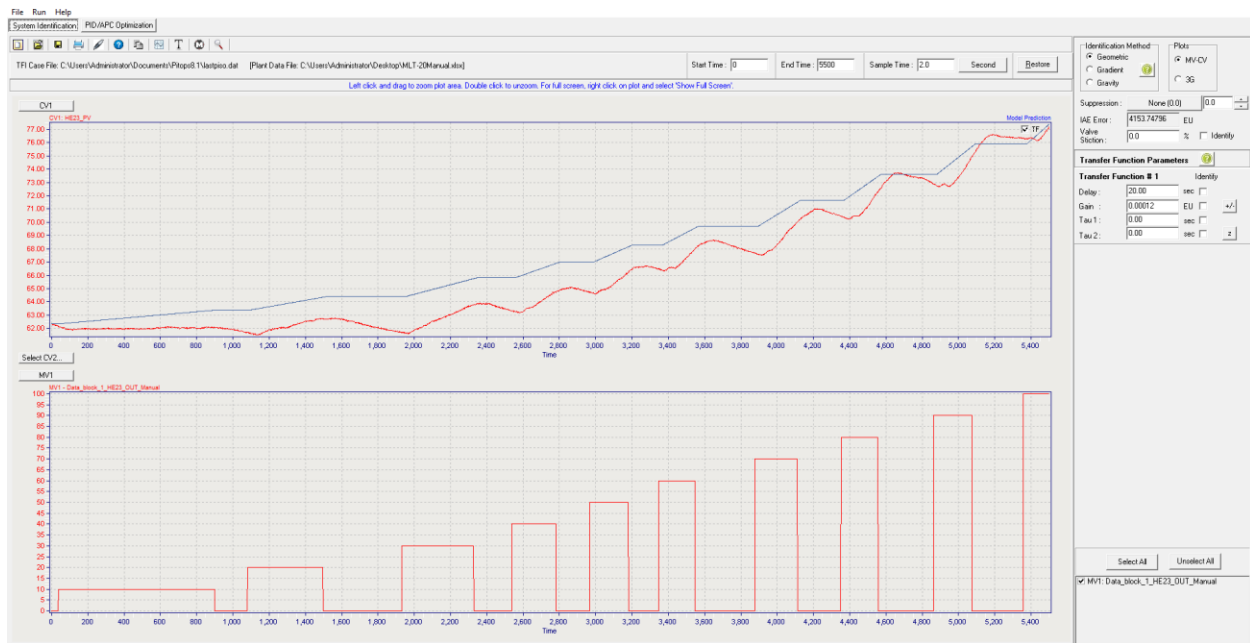
3.3. Određivanje parametara procesa i regulatora

3.3.1 Određivanje parametara procesa

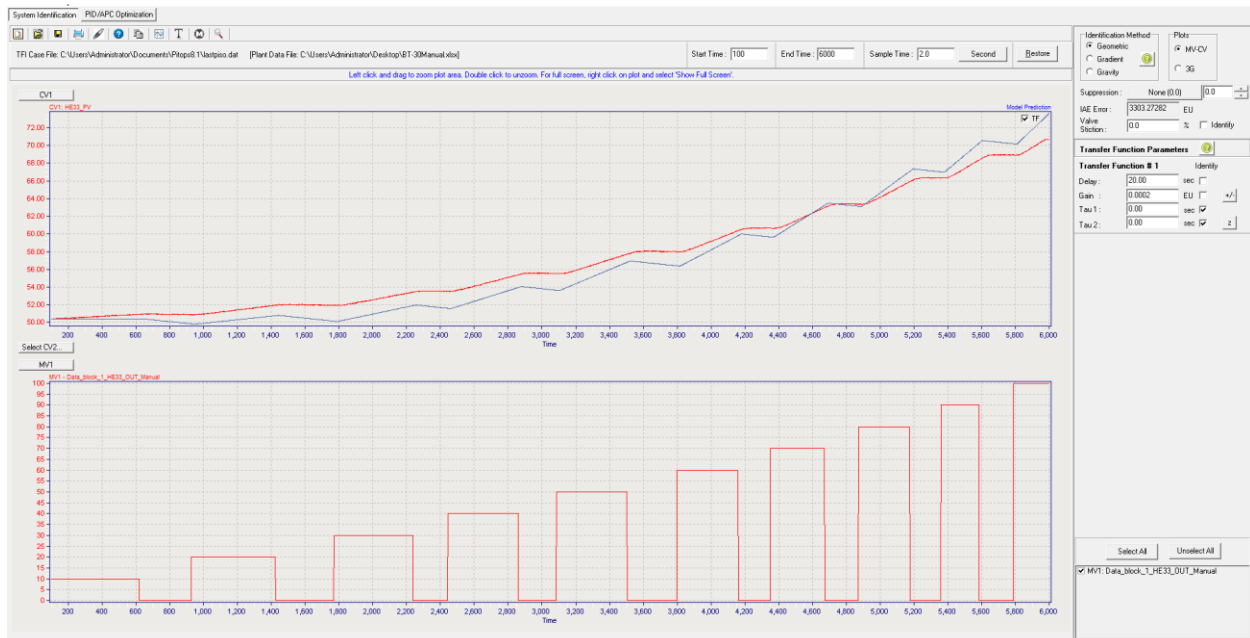
Program ‘Pitops’ alat je koji se koristi za optimizaciju i ugađanje regulatora. Olakšava i ubrzava analizu podataka prikupljenih iz procesa i izračunavanje parametara regulatora. Prvo se identificira model procesa na temelju ulaznih i izlaznih podataka iz stvarnog sustava. Program primjenjuje optimizacijske algoritme za računanje parametara procesa (kao što su statička osjetljivost, mrtvo vrijeme, vremenska konstanta, integracijska brzina) i, zatim, na temelju tih informacija određuje optimalne parametre (proporcionalni, integracijski i derivacijski) regulatora. Nakon identifikacije modela procesa, optimiraju se parametri regulatora kako bi se minimiziralo odstupanje i osigurao stabilan rad. Rezultati su prikazani na grafovima na kojima se prati odziv sustava shodno izračunatim parametrima regulatora.



Slika 13. Usporedba modela procesa i eksperimentalnih podataka za spremnik tople vode HWT – 10



Slika 14. Usporedba modela procesa i eksperimentalnih podataka za spremnik MLT - 20



Slika 15. Usporedba modela procesa i realnih podataka za BT – 30

Za određivanje parametara modela provedeno je testiranje na skok. Nakon toga se optimizacijskim algoritmom računajuparametri, u ovom slučaju mrtvo vrijeme i integracijska brzina. U ovom slučaju ne može se definirati vremenska konstanta jer je se radi o procesu sa sporim odzivom koji je prikladno aproksimirati integrirajućim odzivom koji ne doseže se novo ustaljeno stanje nakon

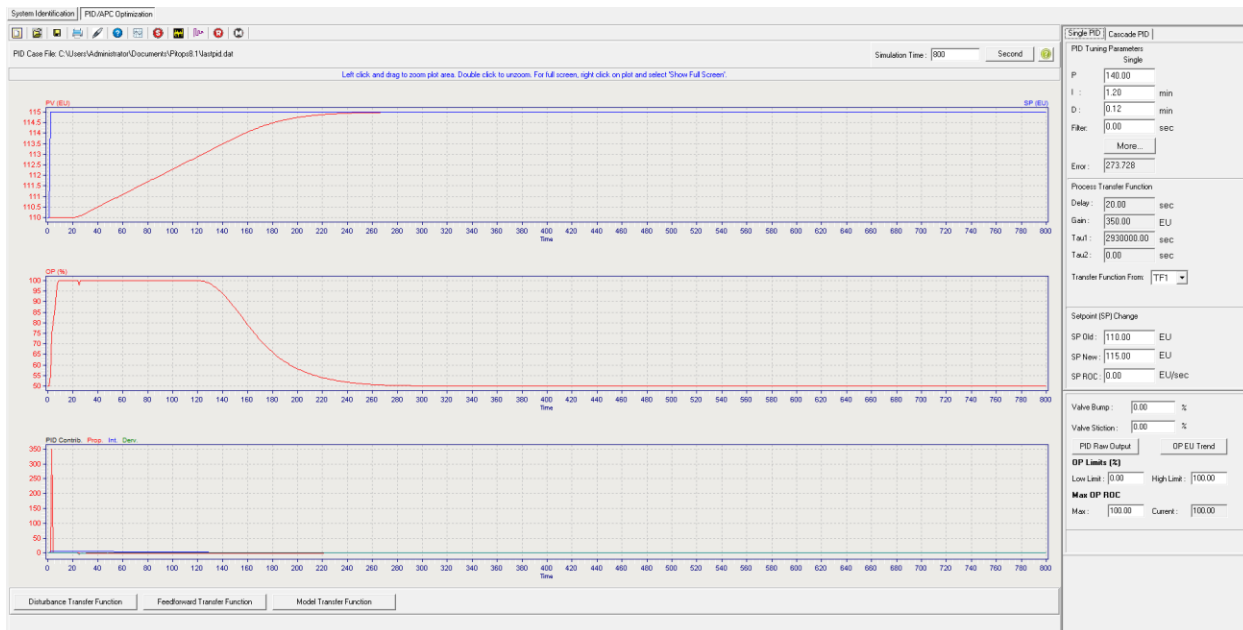
skokomične promjene snage grijala. Izračunate vrijednosti mrtvog vremena za spremnik tople vode HWT – 10 i reaktore MLT – 20 i BT – 30 iznosi 20 s, dok se integracijska brzina razlikuje za sva tri spremnika. Za spremnik tople vode HWT – 10 iznosi 0,0004 °C, za reaktor MLT – 20 iznosi 0,00012 °C, a za reaktor BT – 30 0,0002 °C. Na slikama 13, 14 i 15 vidljivo je da model, označen plavom krivuljom, prati promjene izmjerene temperature, *PV*, označenu crvenom krivuljom. Odstupanje se kvantificira integralom apsolutne pogreške (engl. *integral absolute error* - IAE), koja za spremnik tople vode HWT -10 iznosi 2828,41; za reaktor MLT – 10 4135,75; dok za reaktor BT – 30 iznosi 3303,28. Što je vrijednost IAE veća, veća je i greška te možemo zaključiti kako reaktor MLT – 20 ima najveće odstupanje od izmjerenih podataka.

3.3.2 Određivanje parametara regulatora

Programskim alatom *Pitops* izračunati su optimalni parametri regulatora metodom IAE. Odzivi dobiveni simulacijom prikazani su na slikama 16, 17 i 18.



Slika 16. Simulacija djelovanja regulatora temperature u spremniku tople vode HWT - 10



Slika 17. Simulacija djelovanja regulatora temperature u reaktoru MLT – 20



Slika 18. Simulacija djelovanja regulatora temperature u reaktoru BT – 30

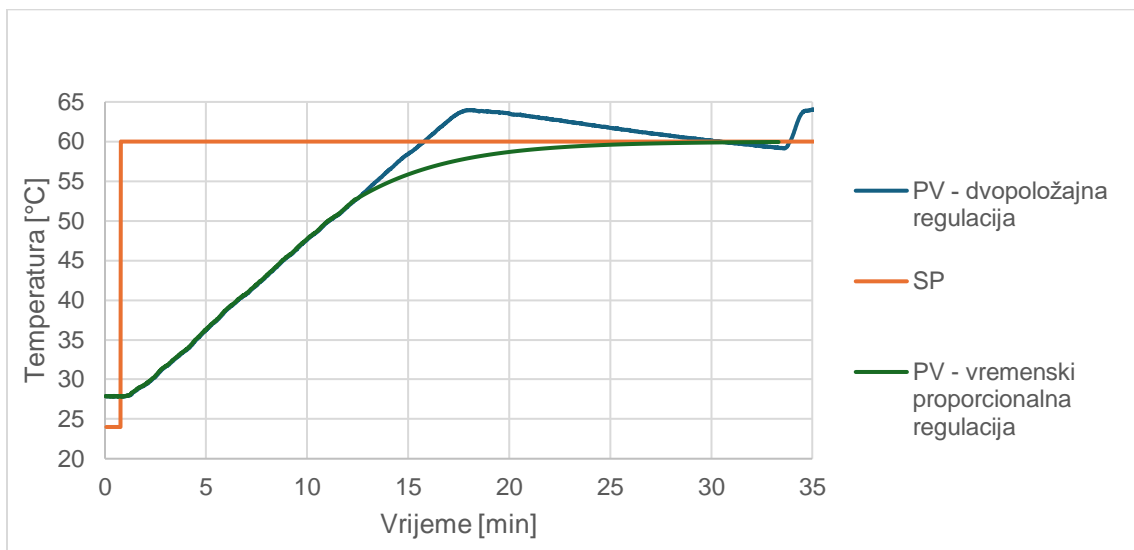
U tablici 1 prikazani su parametri regulatora s kojima su provedene simulacije. Simulirala se skokovična promjena radne točke za 5 °C.

Tablica 1. Izračunati optimalni parametri regulatora

	k_c	τ_i	τ_d
HWT – 10	25,00	1,80 min	0,00 min
MLT – 20	140,00	1,20 min	0,12 min
BT – 30	100	1,00 min	0,12 min

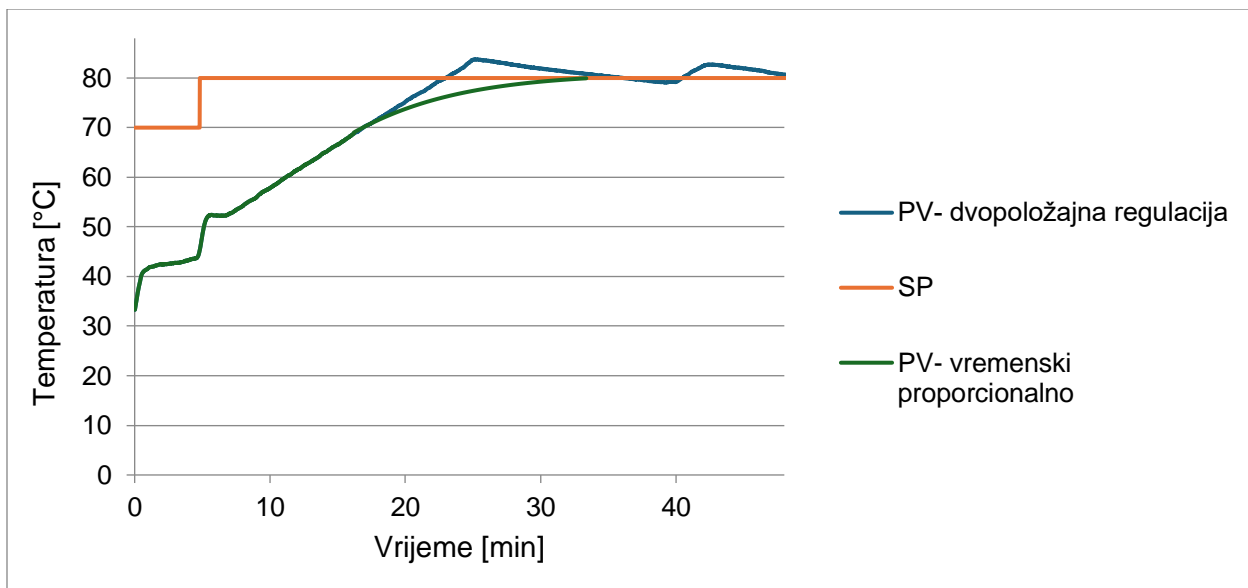
4. RASPRAVA

Nakon ugađanja, usporedilo se djelovanje vremenski proporcionalnog i dvopoložajnog regulatora analizom odziva temperature na promjenu radne točke.



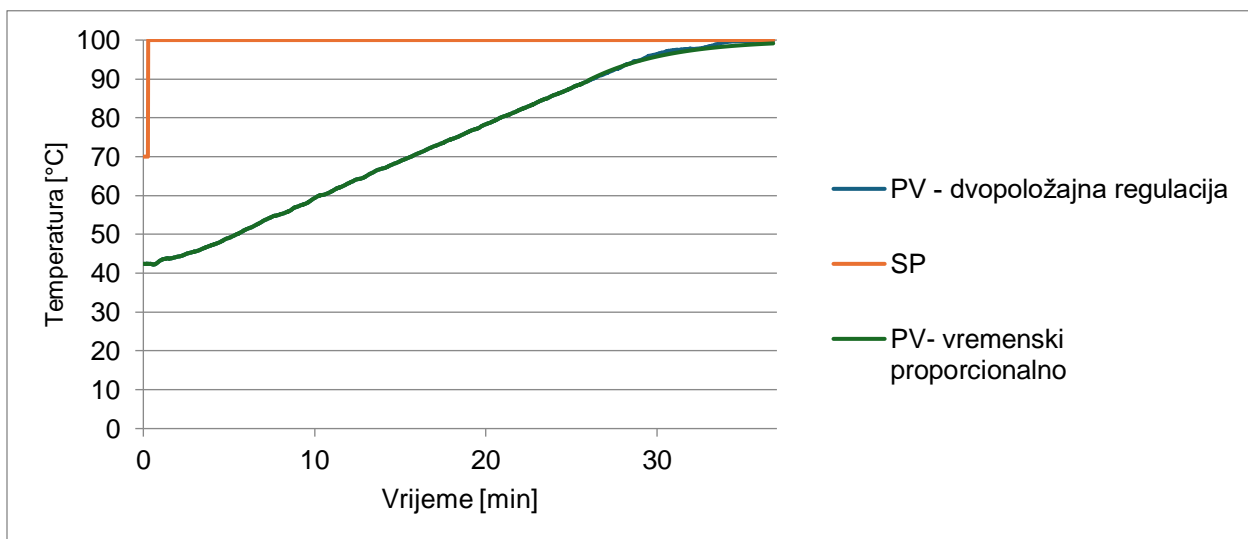
Slika 19. Usporedba Odziva temperature na promjenu radne točke u HWT-10

Na slici 19 prikazani su odzivi temperature u spremniku tople vode HWT – 10 za dvopoložajnu regulaciju i vremenski proporcionalnu regulaciju s radnom točkom 60 °C, narančasta linija. Dvopoložajna regulacija, označena plavom linijom pokazuje brz rast temperature i prelazi zadanu vrijednost (SP). V je prebačaj od 2 °C. Siva linija, odnosno vremenski proporcionalna regulacija bez prebačaja doseže zadanu vrijednost.



Slika 20. Usporedba Odziva temperature na promjenu radne točke u MLT – 20

Na slici 20 prikazan je, također, dinamički odziv temperature u reaktoru MLT – 20 za dvopoložajnu regulaciju i vremenski proporcionalnu regulaciju s radnom točkom 80 °C. Kod odziva dvopoložajnog regulatora vidljiv nagli porast temperature uz prebačaj od 4 °C. Vremenski proporcionalna regulacija postepeno doseže zadanu vrijednost temperature bez prebačaja radne točke.



Slika 21. Usporedba Odziva temperature na promjenu radne točke u BT - 30

Na slici 21 primjećuje se razlika u odnosu na prethodne grafove, uz radnu točku 100 °C. Odziv dvopoložajne regulacije, i odziv vremenski proporcionalne regulacije se preklapaju. U reaktoru BT – 30 nema pojave prebačaja.

Na slikama 19, 20 i 21 vidljivo je da je odziv temperature za sva tri spremnika vode na početku isti. Razlog tomu je taj što regulator u vremenski proporcionalnoj regulaciji na početku (kada je velika razlika između vođene varijable i radne točke, tj. željene temperature) zadaje najveću moguću snagu grijala, *OP*, 100 %. Isti je iznos kod dvopoložajne regulacije. Nakon određenog vremena, kako se temperatura približava *radnoj točki*, vremenski proporcionalnoj regulaciji ima smislanje se izlaz, dok dvopoložajna regulacija zadržava *izlaz* na 100 %.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu uspoređivane su dvopoložajna i vremenski proporcionalna regulacija.

Usporedbom se pokazalo da dvopoložajna regulacija ima određene nedostatke u smislu održavanja temperature nakon postizanja radne točke. Naime, u spremniku tople vode HWT – 10 i reaktoru MLT – 30 primjećen je porast temperature nakon dostizanja radne točke, što je uzrokovalo prebačaj i oscilacije. Ovaj efekt bio je manje izražen u reaktoru BT – 30 zbog toga što je temperatura vode dosegla temperaturu vrenja.

Vremenski proporcionalna regulacija omogućava finije ugađanje temperature kontinuiranom prilagodbom perioda uključivanja i isključivanja grijala, čime se emulira djelovanje kontinuiranog regulatora. Takvom regulacijom radna točka dostigla se bez prebačaja u sva tri slučaja.

Zaključno, vremenski proporcionalna regulacija prikladna je kada je potrebno održavati temperaturu bez prebačaja, a na raspolaganju je izvršna sprava koja djeluje diskretno. Za temperaturno osjetljive procese to je izuzetno bitno kako bi se procesi održali u optimalnom stanju.

5. LITERATURA

1. Tomić, A. M. (2017) *Regulacija temperature u šaržnim reaktorima*. Diplomski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu.
2. Marlot, N. (2015) *Vođenje šaržnih procesa*. Završni rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu.
3. <https://www.cs.montana.edu/webworks/projects/stevesbook/contents/chapters/chapter008/section002/blue/page001.html> (pristupljeno 10. rujna 2024.)
4. Bird R. B., Stewart W. E., Lightfoot E. N. (2002) *Transport Phenomena*. J. Wiley.
5. Bolf, N. (2014) Imenje i nazivlje u kemiji i kemijskom inženjerstvu: Automatika, vođenje, upravljanje i regulacija procesa. *Kem. Ind.* 63 (7-8) 278–280
6. Bolf, N. (2015) Mjerna i regulacijska tehnika. *Kem. Ind.*, 64 (9-10) 578–580.
7. <https://www.supersystems.com/files/WebManuals/Series8/Content/7.2.11%20Effect%20of%20Control%20Action%20Hysteresis%20and%20Deadband.htm> (pristupljeno 10. rujna 2024.)
8. <https://www.instrumentationtoolbox.com/2015/11/how-to-measure-control-valve-deadband.html> (pristupljeno 10. rujna 2024.)
9. <https://x-engineer.org/on-off-control-system/> (pristupljeno 10. rujna 2024.)

10. VanDoren, V. (2009) Time-proportional control: More from an on/off switch. *Control Engineering -Highlands Ranch- Cahners then Reed Business Information-*. 56.
11. Petrovački, D. (2018) Osnove PID regulatora. Materijali za kolegij Sistemi automatskog upravljanja. Državni Univerzitet u Novom Pazaru.
12. Petrović, D., Marinković, D. (2009) Precizna regulacija temperature primenom PI regulatora i širinsko impulsne modulacije. *Magazin Mehatronika*.