Modeliranje i simulacija industrijskih procesa

Bošnir, Domagoj

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:745956

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Domagoj Bošnir

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE

SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Domagoj Bošnir

MODELIRANJE I SIMULACIJA INDUSTRIJSKIH PROCESA

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: prof. dr. sc. Nenad Bolf

Članovi ispitnog povjerenstva: prof. dr. sc. Nenad Bolf
dr. sc. Željka Ujević Andrijić
doc. dr. sc. Igor Dejanović

Zagreb, rujan 2018.

Zahvaljujem svojem mentoru, prof. dr. sc. Nenadu Bolfu na odabiru teme, susretljivosti, uloženom trudu i vremenu, prenesenom znanju i savjetima koji su pomogli u izradi ovog rada.

Zahvaljujem asistentu *mag.ing.cheming Hrvoju Doriću na uloženom trudu i vremenu pri izvedbi eksperimentalnog djela ovog rada.*

Zahvaljujem obitelji i prijateljima koji su mi bili podrška tijekom cijelog školovanja, a posebno tijekom izrade ovog rada.

Sažetak

Procesi prijenosa topline često se pojavljuju u industrijskoj praksi. Neki proizvodi u primjerice farmaceutskoj ili prehrambenoj industriji su vrlo osjetljivi na promjene temperature.

U ovom je radu projektiran, izveden i ispitan laboratorijski uređaj za analizu dinamičkog vladanja toplinskog procesa. Uređaj je namijenjen za demonstraciju razvoja dinamičkih modela procesa I. i II. reda na temelju eksperimentalnih podataka. Njegova je namjena i poučavanje osnovnih metoda vođenja procesa i ugađanja regulatora.

Ključne riječi:

dinamika procesa, vođenje procesa, prijenos topline, regulator, ugađanje regulatora

Abstract

Heat transfer processes are often encountered in the industrial process. Some products in the pharmaceutical and food industry are very sensitive to temperature changes.

Laboratory device for thermal process dynamic behaviour analysis is designed, developed and tested. The set-up is used to demonstrate the development of 1st and 2nd order process dynamics based on experimental data. Furthermore, its purpose is to teach the basic methods of process control and controller tuning.

Key words:
process dynamics, process control, heat transfer, controller, controller tuning

Sadržaj

1. Uvod
2. Teorijski dio
   - 2.1 Opis prijenosa tvari i topline u cijevi
     - 2.1.1 Protjecanje
     - 2.1.2 Prijenos topline konvektivnim mehanizmom
     - 2.1.3 Fizikalna svojstva fluida
     - 2.1.4 Geometrijske karakteristike
     - 2.1.5 Hidrodinamička karakteristike
   - 2.2 Empirijski modeli procesa
     - 2.2.1 Model procesa prvog reda
     - 2.2.2 Procesi višeg reda
   - 2.3 Regulacija temperature
     - 2.3.1 Ručna regulacija
     - 2.3.2 Automatska regulacija
     - 2.3.3 Ugađanje regulatora
3. Eksperimentalni dio
   - 3.1 Prikaz aparature/procesa
   - 3.2 Mjerno-regulacijski sustav
   - 3.3 Plan eksperimenta
     - 3.3.1 Eksperimentalno određivanje parametara procesa
     - 3.3.2 Ugađanje regulatora
     - 3.3.3 Ispitivanje regulacije
4. Rezultati
   - 4.1 Analiza strujanja u cijevi
   - 4.2 Određivanje statičkih i dinamičkih svojstava procesa
   - 4.3 Regulacija temperature
5. Rasprava
6. Zaključak
7. Popis oznaka
8. Literatura
9. Životopis

1. Uvod

Procesi prijenosa topline često se pojavljuju u industrijskoj praksi. Neki proizvodi u primjerice farmaceutskoj ili prehrambenoj industriji vrlo su osjetljivi na promjene temperature. Zbog toga je bitno što bolje upoznati dinamiku toplinskih procesa i metode vođenja. Prijenos topline je spor i trom proces zbog čega je regulacija obično spora, a ponekad i zahtjevna. Regulacija tih procesa zahtjeva široko znanje o sustavu koji se regulira. Potrebno je poznavati karakteristike sustava i čimbenike koji na njega utječu. U ovom radu prikazana je analiza dinamike procesa prijenosa topline s grijala na zrak koji prolazi kroz cijev, te metode regulacije tog sustava.

Eksperiment obuhvaća sljedeće korake:

- određivanje karakteristika odziva procesa
- regulacija temperature primjenom kontinuiranog regulatora
- ugađanje regulatora temperature.

Eksperimentalnu izvedbu čine cijev od stakloplastike na čijem su ulazu grijalo i ventilator. Tri osjetila temperature smještena su duž komore. Pomoću sustava za vođenje procesa podešava se snaga grijanja i brzina okretanja ventilatora.

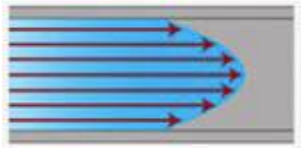
Izvedena aparatura nakon podešavanja i pripreme nastavnih materijala služit će za poučavanje studenata kemijskog inženjerstva osnovama dinamike i vođenja toplinskih procesa. Njezina izvedba i dinamičke karakteristike čine je prikladnom za provedbu na laboratorijskim vježbama.

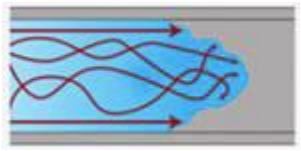
2. Teorijski dio

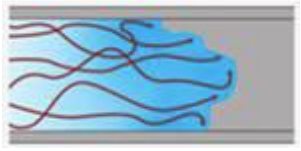
2.1 Protjecanja tvari i energije u cijevi

2.1.1 Protjecanje

Protjecanje je strujanje tekućina kroz cijev, kanal, i općenito strujanje tekućina između čvrstih površina različitih geometrijskih svojstava. Postoji više vrsta strujanja: laminarno, prijelazno i turbulentno. Reynoldsovim eksperimentom uočeno je da se kod vrlo malih brzina obojena kapljevina ne miješa između slojeva, već struji u sredini toka u obliku niti, pa se zaključuje da se čestice tekućina gibaju pravocrtno i da nema miješanja između slojeva. To je tzv. slojevito ili laminarno strujanje.
Povećanjem brzine strujanja dolazi do djelomičnog remećenja slojevitog strujanja, te obojena tekućina struji u obliku krivudave linije. Takvo stanje strujanja naziva se prijelazno područje.
Kod još većih brzina strujanja poprečni presjek cijevi jednolično je obojen, što znači da je došlo do potpunog miješanja slojeva, odnosno pojave vrtloženja i to se gibanje naziva vrtložno ili turbulentno strujanje. [1]


Laminarno strujanje


Prijelazno područje


Turbulentno strujanje

Slika 1. Prikaz načina strujanja

Brzina gibanja (v) nije jedini faktor koji utječe na vrstu strujanja, već je potrebno uzeti u obzir i fizikalna svojstva tekućina, gustoću (ρ) i viskoznost (η), te promjer cijevi (d). Kriterij koji uzima u obzir sve te veličine, a na temelju kojeg se definira vrsta strujanja, jest *Reynoldsova značajka,* Re, koja se definira na sljedeći način:

$$Re = \frac{vd\rho}{\eta} \tag{2.1}$$

Eksperimentalno je utvrđeno da kritična vrijednost Reynoldsove značajke, koja je granica između laminarnog i prijelaznog područja, pri strujanju kroz glatku cijev iznosi Re_{kr} = 2 320. [1]

2.1.2 Prijenos topline konvektivnim mehanizmom

Konvekcija je vrtložni mehanizam prijenosa topline pri čemu se toplina prenosi grupama molekula. Svojstven je za tekućine u gibanju, pri čemu se pod konvektivnim prijenosom topline ne podrazumijeva samo izmjena u masi tekućine, nego čak i značajnije, izmjena između tekućine i čvrste površine. Dakle, konvekcijski mehanizam prijenosa topline povezuje kombinaciju učinaka kondukcije i strujanja tekućine, pri čemu pojedine čestice na različitim temperaturama dolaze u kontakt. Do prijenosa topline dolazi zbog gibanja toplih ili hladnih dijelova tekućina između područja različitih temperatura.

Budući da gibanje može biti uzrokovano lokalnom razlikom gustoća ili kao posljedica utjecaja vanjske sile, razlikuju se:

- *prirodna konvekcija* – gibanje je uzrokovano lokalnim razlikama u temperaturi, a time i gustoći, te dolazi do spontanog miješanja tekućina
- *prisilna konvekcija* – gibanje je uzrokovano primjenom raznih uređaja (pumpe, ventilatori, miješalice).

Prijenos topline je brži kod prisilne konvekcije, pa se prenosi i više topline. Naime, ako iznad tople površine struji tekućina, razvija se hidrodinamički granični sloj. Količina prenesene topline bitno ovisi o hidrodinamičkim uvjetima, jer nije svejedno radi li se o laminarnom ili turbulentnom gibanju tekućine. Kod laminarnog strujanja prevladava konduktivni mehanizam, dok kod turbulentnoga vrtložni mehanizam. Općenito, fluks količine topline ovisi o fizikalnim svojstvima, geometrijskim i hidrodinamičkim svojstvima promatranog sustava.[1]

2.1.3 Fizikalna svojstva fluida

Prijenos topline konvekcijom odvijat će se na različite načine ovisno o fizikalnim svojstvima promatranog sustava. Fizikalna svojstva bitna za konvekciju jesu:

- koeficijent toplinske vodljivosti, λ
- specifični toplinski kapacitet, c_p
- koeficijent temperaturne vodljivosti, a
- dinamička viskoznost, η
- gustoća, ρ.

Svako od navedenih svojstava ovisi o temperaturi, a neka i o tlaku, pa je očit njihov značaj za opis procesa prijenosa topline konvekcijom.[1]

2.1.4 Geometrijske karakteristike

Geometrijske karakteristike bitne za prijenos topline konvekcijom jesu:

- veličina i oblik površine (ravna ili zakrivljena).

Već je rečeno da konvekcijski prijenos topline uključuje i prijenos topline kondukcijom. Za kondukciju je geometrija sustava veoma bitna, te analitička rješenja diferencijalne jednadžbe kondukcije, osim o početnim i graničnim uvjetima, ovise i o geometriji tijela. S druge strane, s obzirom na to da konvekcija uključuje strujanje tekućine, jasan je utjecaj geometrije sustava, posebice ako tekućina struji oko tijela koje je na različitoj temperaturi. Osim toga, što je veća površina izmjene topline (na primjer kod izmjenjivača topline), izmijenit će se veća količina topline između tekućine i tijela. [1]

2.1.5 Hidrodinamička svojstva

Promjenom hidrodinamičkih uvjeta, koji su definirani Re-značajkom, dolazi do promjene debljine hidrodinamičkog, a istodobno i debljine toplinskoga graničnog sloja:

- srednja brzina strujanja, v_{sr}
- Reynoldsova značajka, Re
- debljina hidrodinamičkoga graničnog sloja, δ_h. [1]

2.2 Empirijski modeli procesa

Pojednostavljeni modeli procesa opisuju dominantna svojstva procesa koje je lako odrediti iz testa na skok. Ovakvi modeli opisuju dinamičko vladanje realnog procesa sa zadovoljavajućom točnosti. [2]

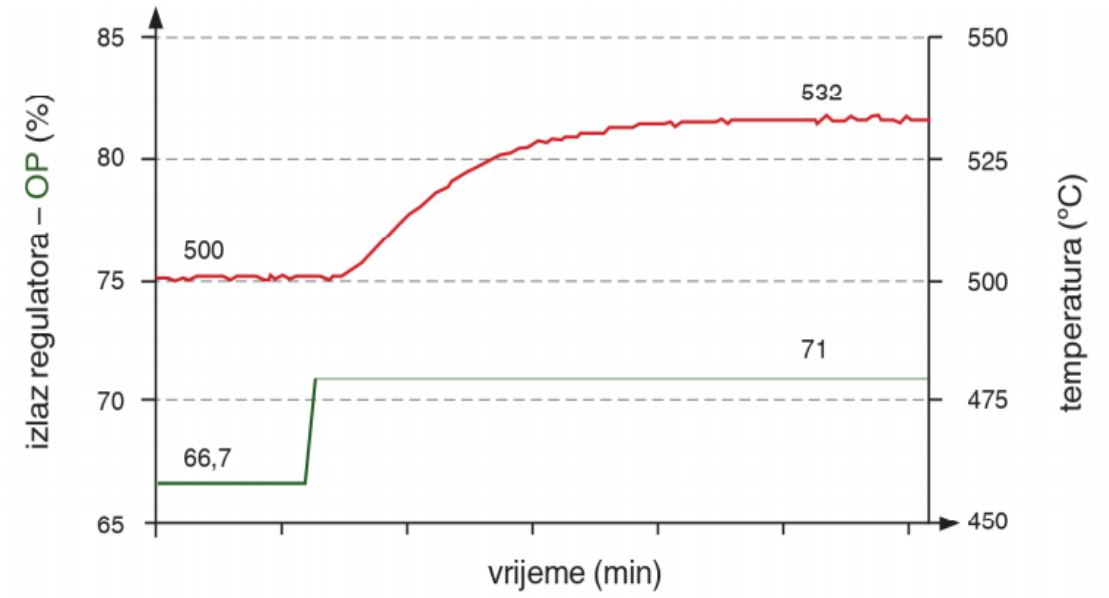
Karakteristične veličine procesa:

1. ulazne varijable – obilježavaju stanje tokova tvari i/ili energije koji uzrokuju promjene akumulacije tvari i/ili energije
2. izlazne varijable – obilježavaju vladanje procesa/sustava koje se očituje kao promjena akumulacije tvari i/ili energije
3. parametri – definiraju strukturu procesa/sustava. Dijele se na parametre svojstvene motrenoj tvari i parametre svojstvene procesnom uređaju.

Vođena varijabla (CV) i mjerena veličina (PV) veličine su koje se prate i čija se vrijednost mora držati na zadanoj vrijednosti.

Upravljana varijabla (MV) i upravljačka veličina (OP) veličine su kojima se upravlja da bismo održali ili doveli vođenu varijablu do željene vrijednosti (SP).

Poremećaji (DV) jesu veličine koje utječu na proces, ali na njih ne možemo izravno utjecati. [3]



Slika 2. Prikaz općenitog testa na skok

Izvor: N. Bolf., Predavanje, Analiza procesa; Dinamičko vladanje procesa, predavanja iz kolegija: Mjerenja i vođenja procesa, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, 2017.

Pri izvođenju testa na skok u proces se uvede promjena, najčešće promjena izlaza regulatora. Pritom se prati prijelaz vođene varijable iz početnog u konačno stanje te se odrede parametri procesa. [2] U eksperimentu toplinskog toka odziv procesa odgovara približno odzivu samoregulirajućih procesa prvog reda.

Parametri samoregulirajućih procesa nužni za ugađanje regulatora određuju se ispitivanjem na skok, a to su statička osjetljivost procesa k, vremenska konstanta τ i mrtvo vrijeme θ.

Vremenska konstanta τ predstavlja vrijeme potrebno da odziv dosegne 63,2 % konačne vrijednosti, mjera je zadrške, te ovisi o procesu i radnim uvjetima.

Statička osjetljivost procesa k određuje se tako da se nakon provođenja testa na skok, izmjerena promjena vođene varijable (Δy) podijeli s izvedenom promjenom upravljane varijable (Δu).

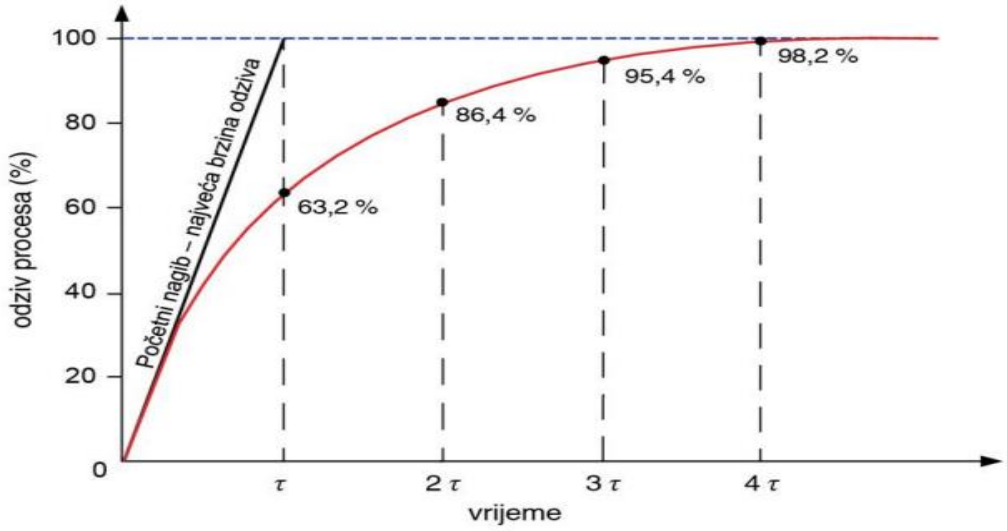
$$k=\frac{\Delta y}{\Delta u}=\frac{\Delta PV}{\Delta OP}; \tag{2.2}$$

Mrtvo vrijeme θ jest vrijeme potrebno za odziv mjerene veličine, nakon promjene upravljačke varijable ili pojave poremećaja.

2.2.1 Model procesa prvog reda

Kod procesa prvog reda prilikom skokomične pobude ulazna veličina trenutno poprima novu vrijednost, a brzina odziva najveća je na početku. Kod analize odziva prati se prijelaz vođene varijable iz početnog u konačno stanje.

Tok odziva procesa prvog reda na skokomičnu ulaznu promjenu može se pratiti na slici 3. Svojstveno joj je eksponencijalno smirivanje. U trenutku τ odziv dostiže 63,2 % svoje konačne vrijednosti, u trenutku 2τ već je na 86,5 % konačne vrijednosti, da bi u trenutku 4τ krivulja dosegla 98,2 % konačne vrijednosti. Dakle, prijelazna se pojava, koja je pobuđena u procesu prvog reda skokomičnom ulaznom promjenom, praktički smiruje nakon trajanja četiri vremenske konstante procesa. [4]



Slika 3. *Odziv procesa 1. reda*

Proces prvog reda matematički se opisuje diferencijalnom jednadžbom prvog reda:

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = ku \; ; \tag{2.3}$$

Ove odzive obilježava akumulacija energije ili tvari, a dinamički odziv definira se vremenskom konstantom τ.

Odzivna funkcija procesa prvog reda glasi:

$$y(t) = \left(1 - e^{\left(-\frac{t}{\tau}\right)}\right) \cdot \Delta y + y_0 \; ; \tag{2.4}$$

Iz toga slijedi da u trenutku $t_1 = \tau$ ta jednadžba poprima oblik:

$$y(t_1) = \left(1 - e^{(-1)}\right) \cdot \Delta y + y_0 \; ; \tag{2.5}$$

– $y(t_1)$ – vrijednost vođene varijable y u trenutku t_1 kad ona dosegne 63,2 % konačne vrijednosti

– Δy – ukupna promjena vođene varijable

– y_0 – početna vrijednost vođene varijable

Iz te jednadžbe može se odrediti vremenska konstanta τ.

$$t_1 = t_0 - \tau \; ; \tag{2.6}$$

– t_0 – vrijeme u trenutku početka odziva;

pa vrijedi:

$$\tau = t_1 - t_0 \; ; \tag{2.7}$$

2.2.2 Procesi višeg reda

Mnogo stvarnih procesa ne može se opisati modelom prvog reda. Veoma se često na skokomičnu pobudu javlja odzivna krivulja, kod koje se najveća brzina odziva ne javlja na početku, već nakon određenog vremena.

Procesi višeg reda javljaju se kad:

- postoji nekoliko serijski povezanih procesa
- regulator u seriji s drugim komponentama regulacijskoga kruga rezultira sustavom višeg reda
- djelovanje sile (ubrzanje, tj. inercija) na tijela ili tekućine
- proces ima raspodijeljena svojstva.

Standardni oblik modela procesa 2. reda:

$$\tau^2 \frac{d^2y}{dt^2} + 2\zeta\tau \frac{dy}{dt} + y = ku(t) \; ; \tag{2.8}$$

$$\tau = \sqrt{\tau_1 \tau_2} \tag{2.9}$$

- k – statička osjetljivost
- τ – vremenska konstanta
- ζ – koeficijent prigušenja.

Oblik odziva procesa 2. reda ovisi o vrijednosti koeficijenta prigušenja, ζ.

Postoje tri oblika vladanja procesa drugog reda:

- $\zeta > 1$, prigušeni odziv
- $\zeta = 1$, kritični odziv
- $0 \leq \zeta < 1$, neprigušeni odziv. [2]

2.3 Metode regulacije temperature

2.3.1 Ručna regulacija temperature

Pri ručnom vođenju, operator periodički očitava procesnu temperaturu i podešava ulaz topline ili hlađenja prema gore ili dolje, u takvom smjeru da vodi temperaturu do željene vrijednosti. Ručnom se regulacijom može koristiti u sustavima gdje male promjene u upravljanoj varijabli uzrokuju polako mijenjanje procesa.

Ručna regulacija praktična je samo u procesima gdje se temperatura ne mijenja često. Da bi ručna regulacija radila, operator mora imati dovoljno vremena za korekciju prije nego što temperatura procesa prijeđe prihvatljivu toleranciju. [5]

2.3.2 Automatska regulacija temperature

Vođena varijabla, u ovom slučaju temperatura, mjeri se odgovarajućim osjetilom i pretvara se u signal prihvatljiv regulatoru.

Regulator uspoređuje temperaturni signal sa željenom temperaturom i aktivira upravljački uređaj. Izvršni element za upravljanje mijenja upravljanu varijablu kako bi promijenio količinu topline koja se predaje ili preuzima iz procesa. Uobičajene upravljane varijable u procesima regulacije temperature jesu: protoci zraka, vode, pare, ulja i plina. [5]

Postoje dvije osnovne vrste regulatora: dvopoložajni i kontinuirani regulator.

Dvopoložajni regulator najjednostavniji je oblik uređaja za regulaciju temperature. Upravljačka varijabla poprima samo najmanju ili najveću vrijednost. Dvopoložajni regulator isključit će izlaz samo kad temperatura prelazi zadanu vrijednost. Za regulaciju grijanja izlaz je uključen kad je temperatura ispod zadane vrijednosti. Budući da temperatura prelazi zadanu vrijednost za promjenu izlaznog stanja, temperatura procesa kontinuirano će oscilirati.

Kad se oscilacije brzo pojavljuju, regulatoru se postavlja mrtva zona kako bi se spriječilo oštećenje opreme. Mrtva zona onemogućuje da se izlaz brzo mijenja ako vođena varijabla vrlo brzo prelazi iznad i ispod zadane vrijednosti. Dvopoložajna regulacija obično se primjenjuje kad precizna regulacija nije potrebna, u sustavima koji se ne mogu nositi s čestim uključivanjem i isključivanjem energije, gdje je masa sustava toliko velika da se temperature mijenjaju vrlo sporo. [6]

Proporcionalni regulator osmišljen je kako bi se uklonila oscilacija vođene varijable povezana s dvopoložajnom regulacijom. Proporcionalni regulator smanjuje snagu koja se isporučuje na grijalo kako se temperatura približava zadanoj vrijednosti. Posljedica je toga usporavanje grijala tako da temperatura neće nadmašiti zadanu vrijednost, ali će joj se približiti i održati stabilnu temperaturu.

Ovo djelovanje regulatora može se postići uključivanjem i isključivanjem izlaza na kratke vremenske intervale. Ovaj „vremenski raspored" varira omjer vremena uključenog izlaza i vrijeme isključenog izlaza. Proporcionalno djelovanje događa se unutar „proporcionalnog pojasa" oko zadane vrijednosti temperature. Izvan ovog pojasa regulator funkcionira kao dvopoložajni regulator, s izlazom ili potpuno uključenim ili potpuno isključenim. Međutim, unutar pojasa izlaz se uključuje i isključuje u omjeru ovisnom o mjernoj razlici temperature od zadane vrijednosti. Na zadanoj vrijednosti (srednja točka proporcionalnog pojasa) izlazni je omjer 1:1; to jest uključeno i isključeno vrijeme izlaza jednaki su u jednom vremenskom intervalu. Ako je temperatura dalje od zadane vrijednosti, vrijeme uključivanja i isključivanja ovisi o razlici temperature od zadane vrijednosti. Ako je temperatura ispod zadane vrijednosti, izlaz će biti dulje uključen; ako je temperatura previsoka, izlaz će biti dulje isključen. [6]

Treći tip regulatora, proporcionalno-integracijsko-derivacijski regulator (**PID regulator**) pruža proporcionalno s integralnim i derivacijskim djelovanjem. Ovaj regulator kombinira proporcionalnu regulaciju s dva dodatna djelovanja, što pomaže regulatoru da automatski kompenzira promjene u sustavu. Proporcionalni, integralni i derivacijski parametri moraju se pojedinačno podesiti. Od tri tipa regulatora, PID regulator pruža najstabilnu regulaciju u sustavima koji imaju relativno malu masu, onima koji brzo reagiraju na promjene u energiji dodanoj procesu. Preporuča se u sustavima gdje se opterećenje često mijenja, a očekuje se da će regulator automatski postići radnu točku zbog čestih promjena zadane vrijednosti, raspoložive količine energije. [6]

2.3.3 Ugađanje PID regulatora

Parametre koje treba odrediti pri ugađanju regulatora jesu:

- konstanta pojačanja K_c
- integracijsko vrijeme τ_i
- derivacijsko vrijeme $\tau_{d.}$

Algoritam ovog regulatora glasi:

$$OP = K_c(1 + \frac{1}{\tau_i}\int e\,dt + \tau_d \frac{d}{dt}\ ) \tag{2.10}$$

Kad je regulator loše podešen, temperatura može oscilirati oko zadane vrijednosti, sporo reagirati na promjene ili pretjerano prebaciti zadanu vrijednost pri pokretanju, odnosno kad se mijenja zadana vrijednost.

Ziegler-Nichols metoda otvorenoga kruga provodi se u ručnom načinu rada. Analizira se odziv mjerene veličine na skok upravljačke varijable. Promjena upravljačke varijable mora biti tolika koliko to proces dopušta. Tijekom mjerenja pretpostavlja se da se mjerena veličina mijenja samo zbog promjene upravljačke varijable. Iz grafičkog prikaza potrebno je odrediti nagib tangente (R_r) odzivne krivulje procesa u točki infleksije i mrtvo vrijeme (Θ). Na temelju empirijskih relacija određuju se parametri regulatora. [7]

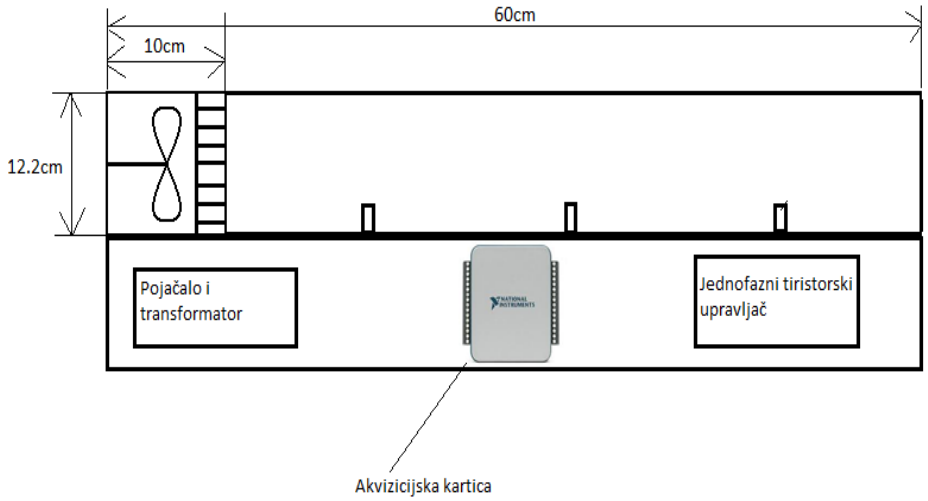
Tablica 1. Empirijske relacije za određivanje parametara regulatora

	Parametar		
Regulator	K_c	τ_i	τ_d
P	$=\Delta OP/(\Theta \cdot R_r)$		
PI	$=0{,}9 \cdot \Delta OP/(\Theta \cdot R_r)$	$=3{,}33 \cdot \Theta$	
PID (paralelni)	$=1{,}5 \cdot \Delta OP/(\Theta \cdot R_r)$	$=2{,}5 \cdot \Theta$	$=0{,}4 \cdot \Theta$
PID (serijski)	$=1{,}2 \cdot \Delta OP/(\Theta \cdot R_r)$	$=2{,}0 \cdot \Theta$	$=0{,}5 \cdot \Theta$

3. Eksperimentalni dio

3.1 Prikaz aparature/procesa

Aparatura za provođenje eksperimenta toplinskog toka sastoji se od plastične cijevi pravokutnoga poprečnog presjeka. Na početku cijevi smješteni su ventilator i grijalo, dok su duž cijevi smještena tri temperaturna osjetila Pt-100. Ispod cijevi je elektronika za prikupljanje podataka i vođenje sustava. Cijela je aparatura spojena s računalom na kojem se prikupljaju podaci i proces vodi pomoću programa *LabView*.



Slika 4. Grafički prikaz aparature za provođenje eksperimenta

Zrak struji preko grijala, a toplina se prenosi s grijala na zrak konvektivnim mehanizmom. Toplinski tok s grijala na zrak ovisi o površini grijala A, razlici temperature između grijala i zraka $\Delta T = (T_g - T_z)$ i o koeficijentu prijenosa topline α.

$$q_{konv} = A \cdot \alpha \cdot (T_g - T_z) \tag{3.1}$$

Tablica 2. Tehnička svojstva opreme

OPREMA	SVOJSTVA	
Grijalo	Ulazni napon: 220 V Maksimalna snaga grijala: 400 W Upravljački signal: 0-10 V DC	
A/D i D/A pretvornik	Analog: 8 ulaza – 14 bitna Ulazni napon: +/- 10 V	Digital: 13 ulaza/izlaza Ulazni napon: +/- 10 V
	2 izlaza – 14 bitna Izlazni napon: +/- 10 V	
Osjetila Pt-100	2x10 mm	
	Thin film standard	
Ventilator	Ulazni napon: 12 V Najveći mogući protok: 93.5 m^3h^{-1}	

Tablica 3. Geometrijska svojstva opreme

Oprema			
	Širina	**Visina**	**Duljina**
Cijev	12,3 cm	12,2 cm	60 cm
Grijalo	12 cm	12 cm	6 cm
Ventilator	12 cm	12 cm	3,6 cm
Površina poprečnog presjeka cijevi	0,0151 m^2		
Površina presjeka izlaza cijevi	0,0113 m^2		

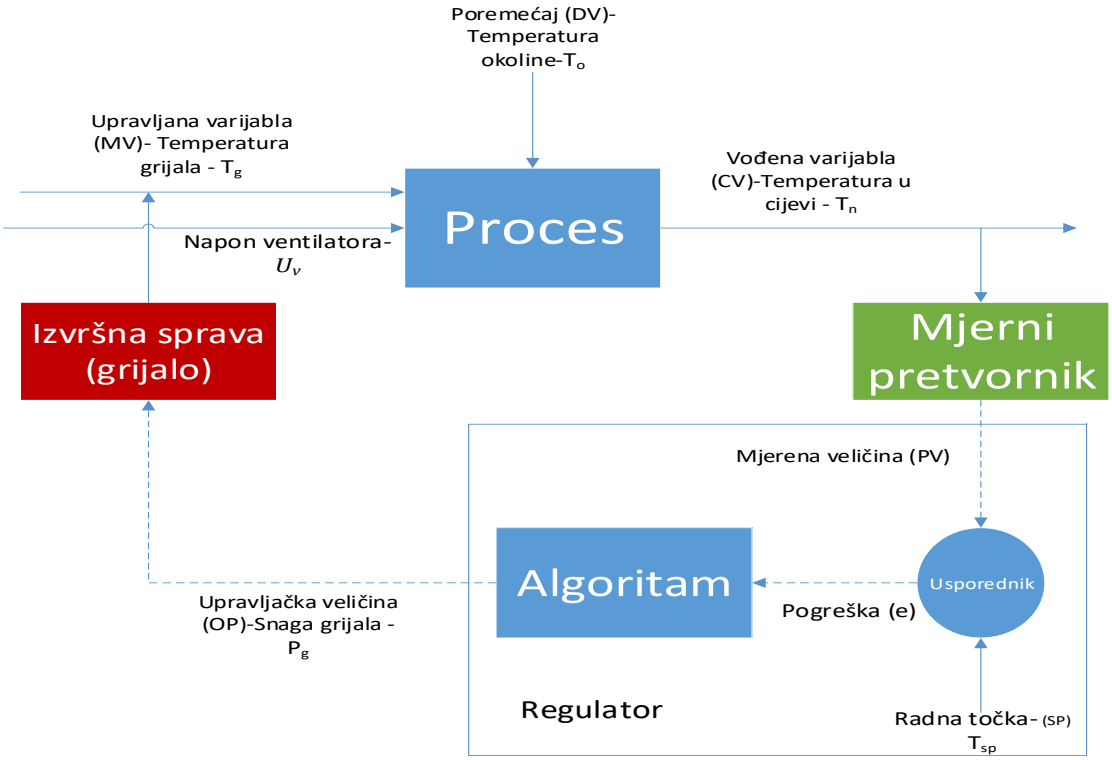
3.2 Mjerno-regulacijski sustav

Za analizu dinamičkog vladanja procesa toplinskog toka potrebno je odrediti utjecaj čimbenika koji utječu na proces. Blok dijagram regulacijskoga kruga prikazan je na slici 5. Na slici su prikazani ulazi i izlazi sustava. Napon ventilatora, U_v i snaga grijala, P_g, utječu na način na koji se temperatura unutar cijevi mijenja s obzirom na temperaturu okoline označenu varijablom T_o.

Promjena temperature na osjetilu *n* može se opisati na sljedeći način:

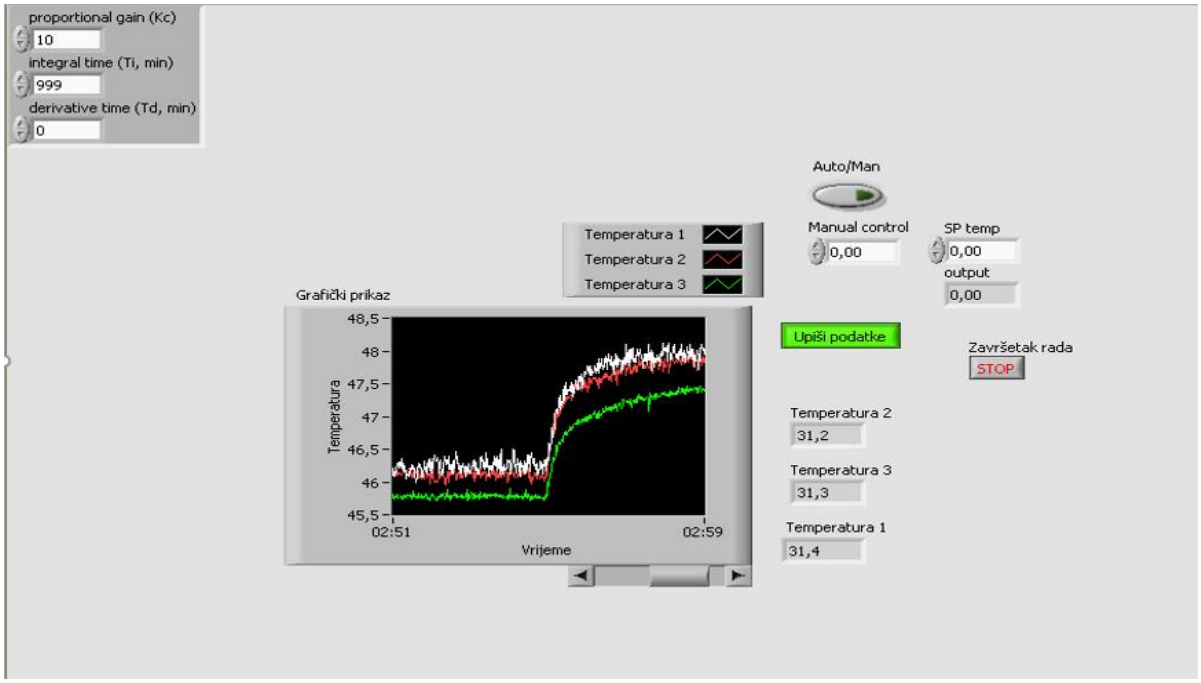
$$\frac{d}{dt}T_n(t) = \mathrm{f}\left(P_g, U_v, T_o, x_n\right) \tag{3.2}$$

gdje je x_n udaljenost između *n*-tog osjetila i grijala.



Slika 5. Blok dijagram regulacijskoga kruga eksperimenta

Temperatura u cijevi mjeri se s tri osjetila Pt-100 smještena duž cijevi. Izmjerena vrijednost temperature očitava se na sučelju programa. Unutar tog programa izvede je algoritam za regulaciju temperature. Sve varijable zapisuju se u datoteku. Na grafičkom sučelju može se pratiti promjena temperature u vremenu i podešavati parametri regulatora.



Slika 6. Grafičko sučelje za vođenje procesa

3.3 Plan eksperimenta

3.3.1 Eksperimentalno određivanje parametara procesa

Na početku eksperimenta određuju se statički i dinamički parametri procesa koji će se kasnije primijeniti pri ugađanju regulatora. Izvode se odzivi procesa na veliki skok upravljane varijable u oba smjera i odzivi procesa na male skokove upravljane varijable u oba smjera. Iz tih podataka određuju se statička osjetljivost, mrtvo vrijeme, vremenska konstanta procesa i statičko svojstvo na pojedinom osjetilu.

3.3.2 Ugađanje PI regulatora

Nakon eksperimentalnog određivanja parametara procesa slijedi ugađanje regulatora. Parametri koji se određuju, u ovom slučaju, su konstanta pojačanja (K_c) i integracijsko vrijeme (τ_i). Ugađanje regulatora provelo se prvo metodom pokušaja i pogreške, dok dinamičko vladanje procesa ne bude prihvatljivo. To znači da se temperatura stabilizira na zadanoj vrijednosti relativno brzo bez prebačaja i oscilacija. Zatim se ugađanje provelo Ziegler-Nicholsovom metodom otvorenog kruga pri čemu se empirijski dobivenim jednadžbama računaju parametri regulatora na temelju ispitivanja na skok.

3.3.3 Ispitivanje djelovanja procesa u regulacijskom krugu

Nakon što su parametri regulatora izračunati, provjerilo se vladanje procesa eksperimentom. Pri tome se mijenjala radna točka i pratila promjena temperature. Ako su parametri dobro određeni regulacija će biti zadovoljavajuća. Kod regulacije s parametrima koji su izračunati Ziegler-Nichols metodom otvorenog kruga očekuje se brža stabilizacija na zadanoj vrijednosti nego metodom pokušaja i pogreške.

4. Rezultati

4.1 Analiza strujanja u cijevi

Za poprečne presjeke cijevi kao što su prstenasti, trokutasti, pravokutni i slični računa se ekvivalentni promjer d_{ekv}. Za pravokutne poprečne presjeke primjenjuje se jednadžba:

$$d_{ekv} = \frac{4P}{O}; \tag{4.1}$$

pri čemu su:
P – površina poprečnog presjeka
O – opseg presjeka.

Za turbulentni protok u cijevima s poprečnim presjecima koji nisu kružni možemo se služiti korelacijama za kružne cijevi. Umjesto promjera upotrebljava se ekvivalentni promjer u tim korelacijama.

$$d_{ekv} = \frac{4 \cdot (0{,}122\ m \cdot 0{,}123\ m)}{(2 \cdot 0{,}122\ m + 2 \cdot 0{,}123\ m)}$$

$$d_{ekv} = 0{,}122\ m$$

U našem se sustavu zrak pokreće pomoću ventilatora s promjenjivim protokom. Protok se regulira ručno pomoću potenciometra. U eksperimentu je korišten najveći mogući volumni protok. Pri najvećem mogućem protoku zraka kroz cijev izmjerena brzina strujanja (v) zraka iznosi:

$v=2{,}10\ ms^{-1}$

Režim strujanja određuje se pomoću Reynoldsove značajke koja je definirana jednadžbom (2.1).

U eksperimentu se ne upotrebljava cijev kružnoga poprečnog presjeka, već pravokutnoga. Zbog toga moramo upotrijebiti ekvivalentan hidraulički promjer d_{ekv}.

$$Re = \frac{v \cdot d_{ekv} \cdot \rho}{\eta}; \tag{4.2}$$

$$Re = \frac{2{,}10\ m\,s^{-1} \cdot 0{,}122\ m \cdot 1{,}164\ kg\,m^{-3}}{1{,}872 \cdot 10^{-5}\ kg\,m^{-1}s^{-1}};$$

$Re=15\ 930$

Strujanje kroz cijev može se smatrati potpuno razvijenim, kad se profil brzina ne mijenja u aksijalnom smjeru strujanja. Duljina hidrodinamičkog ulaznog područja duž cijevi naziva se hidrodinamička duljina ulaza L_e . Nakon te duljine može se smatrati da je tok potpuno razvijen i više se ne mijenja u aksijalnom smjeru strujanja. Kad je tok potpuno razvijen pad tlaka po duljini cijevi je konstantan, $\frac{dp}{dx} = konst.$ Hidrodinamička duljina ulaza funkcija je Reynoldsova broja

$$L_e = 4{,}4 \cdot d_{ekv} \cdot (Re)^{\frac{1}{6}}; \tag{4.3}$$

$$L_e = 4{,}4 \cdot 0{,}122\ m \cdot (15\,930)^{\frac{1}{6}}$$

$$L_e = 2{,}69\ m$$

Pad tlaka u cijevi računa se prema Darcy-Weissbachovoj jednadžbi:

$$\Delta p = \xi \frac{l}{d_{ekv}} \cdot \frac{v^2 \cdot \rho}{2}; \tag{4.4}$$

ξ– faktor trenja

l – duljina cijevi.

U turbulentnom načinu strujanja faktor trenja ξ ne ovisi samo o hidrodinamici nego i o geometriji sustava $\xi = f(Re, \frac{\varepsilon}{d})$. U eksperimentu se upotrebljava cijev od stakloplastike. Stakloplastika ima apsolutnu hrapavost ε=0.005mm. Relativna hrapavost u sustavu iznosi $\frac{\varepsilon}{d} = 4{,}1 \cdot 10^{-5}$. Faktor trenja ξočitan iz Moodyjeva dijagrama iznosi $\xi = 0{,}27$.

$$\Delta p = 0{,}27 \cdot \frac{0{,}5\ m}{0{,}122\ m} \cdot \frac{(2{,}10\ m\ s^{-1})^2 \cdot 1{,}164\ kg\ m^{-3}}{2}$$

$$\Delta p = 2{,}84\ Pa$$

Strujanje se smatra nestlačivim kada je gustoća tekućina približno konstantna cijelim tokom. Plinovi su stlačivi, promjena tlaka od 0,01 atm uzrokuje promjenu gustoće zraka čak do 1 %. Kriterij za određivanje stlačivog strujanja jest Machov broj, omjer brzine strujanja i brzine zvuka (c) u istom mediju. Utjecaj stlačivosti može se zanemariti ako je $Ma < 0{,}3$.

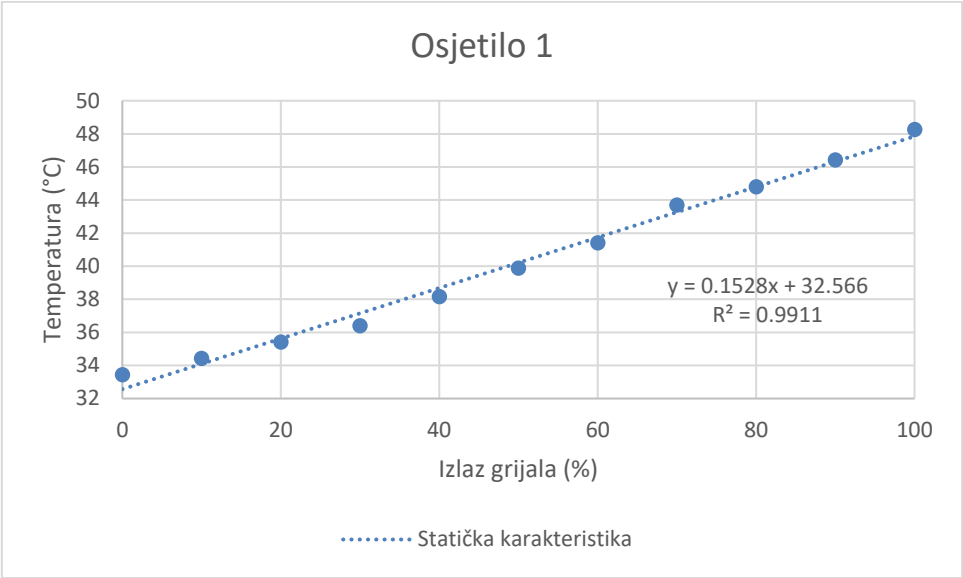
$$Ma = \frac{v}{c}. \tag{4.5}$$

$$Ma = \frac{2{,}10\ m\ s^{-1}}{343\ m\ s^{-1}}$$

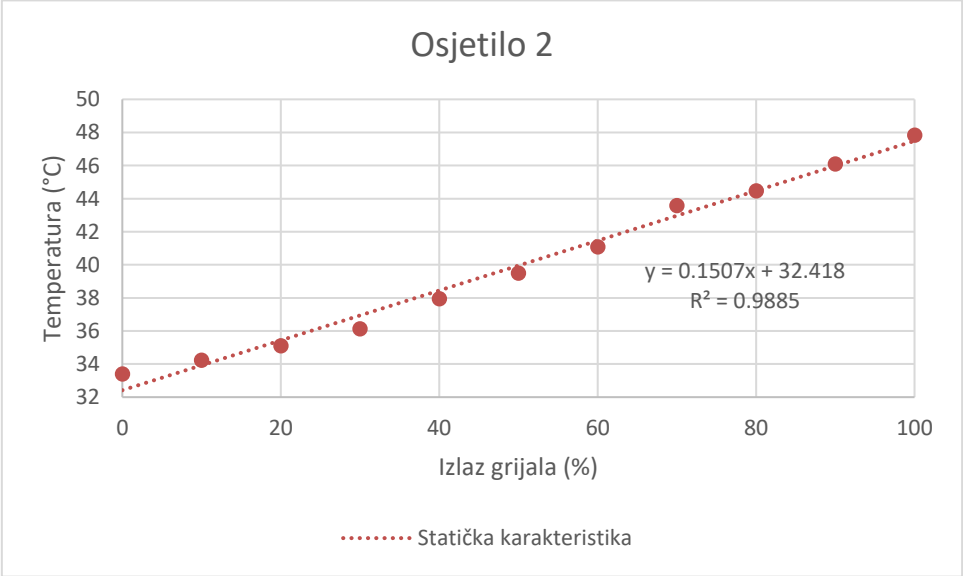
$$Ma = 6{,}12 \cdot 10^{-3}$$

4.2 Određivanje statičkih i dinamičkih karakteristika procesa

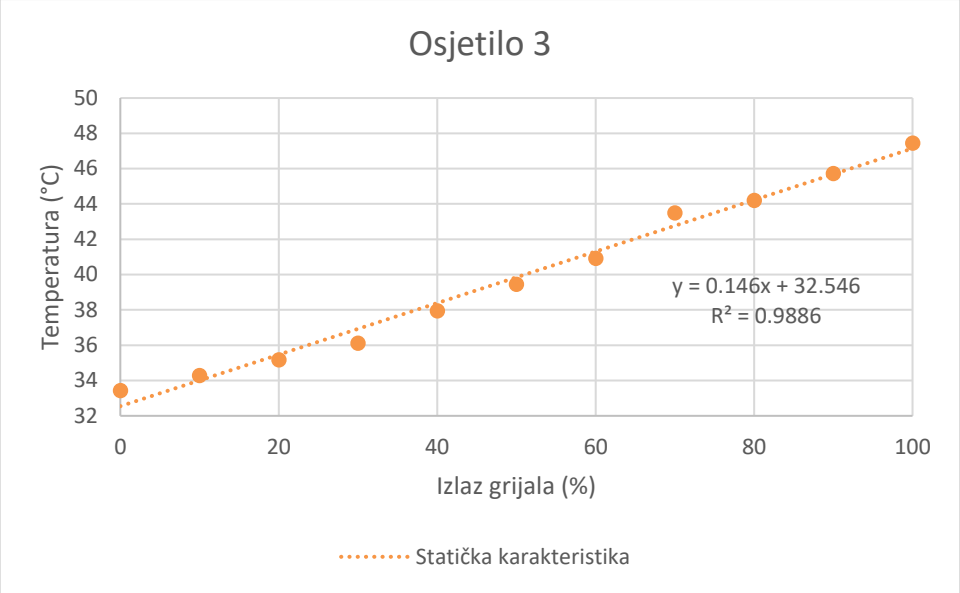
a) Određivanje statičke karakteristike za pojedina osjetila



Slika 7. Statička karakteristika procesa na prvom osjetilu

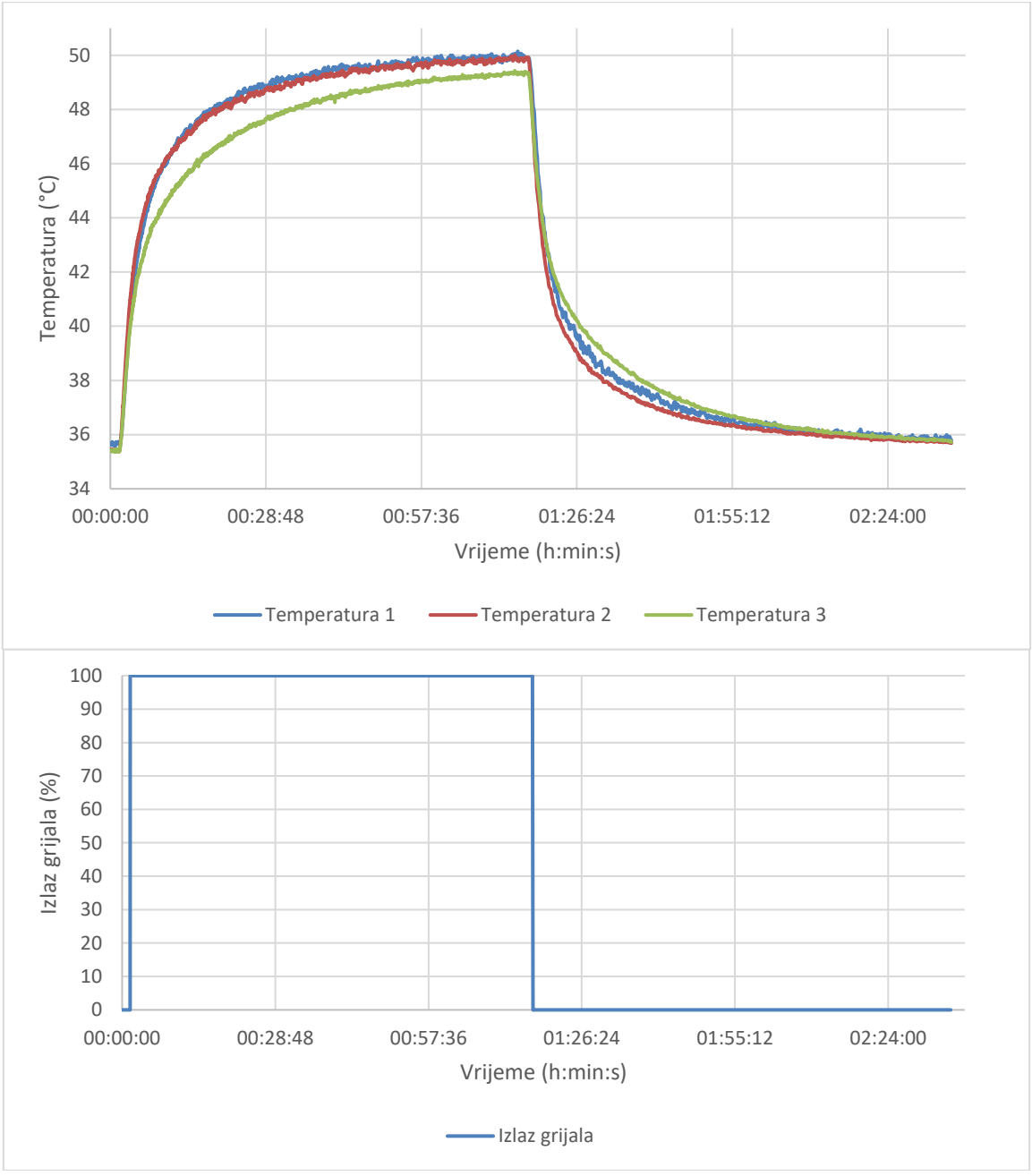


Slika 8. Statička karakteristika procesa na drugom osjetilu



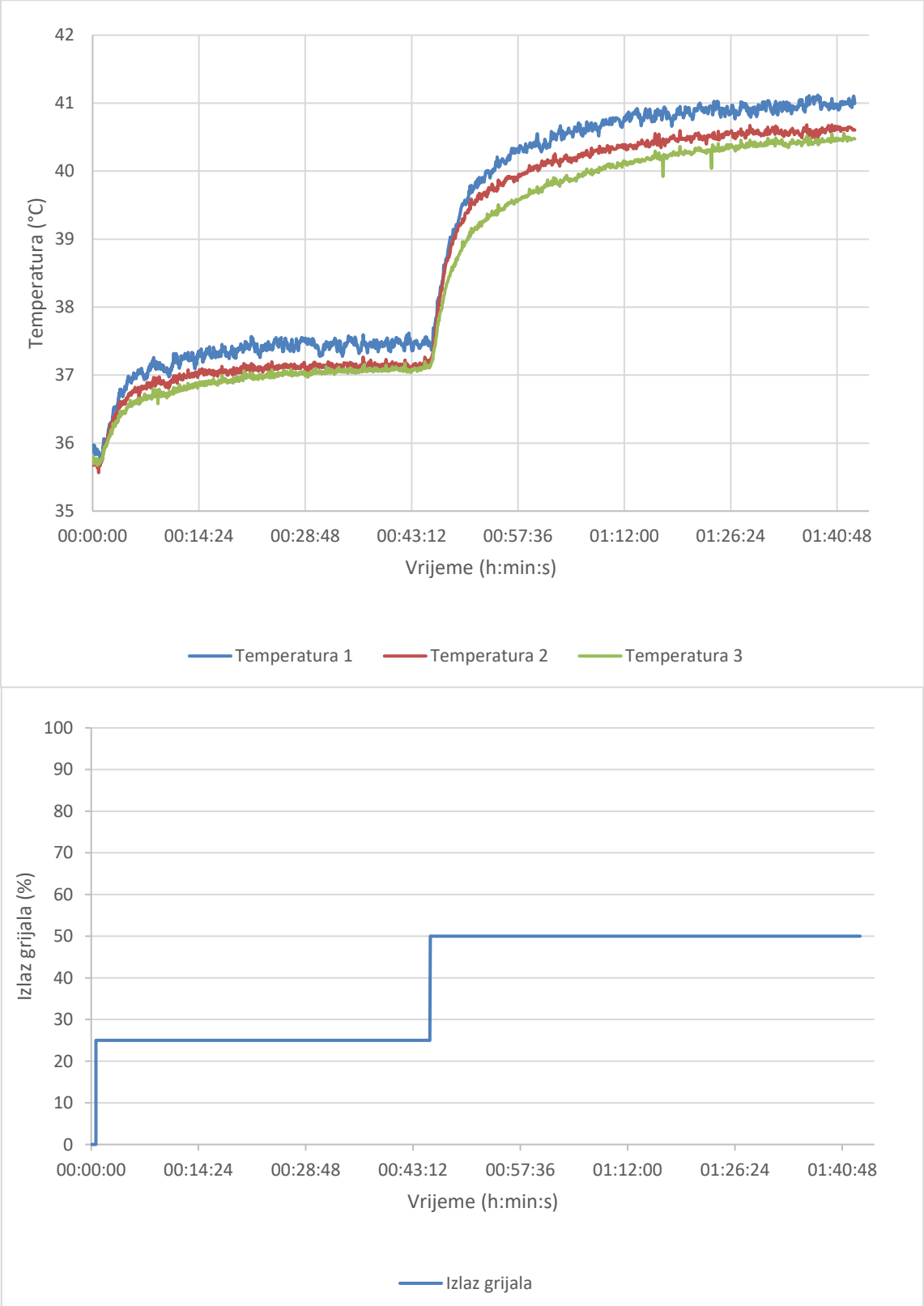
Slika 9. Statička karakteristika procesa na trećem osjetilu

b) Odziv procesa na veliku promjenu upravljačke varijable

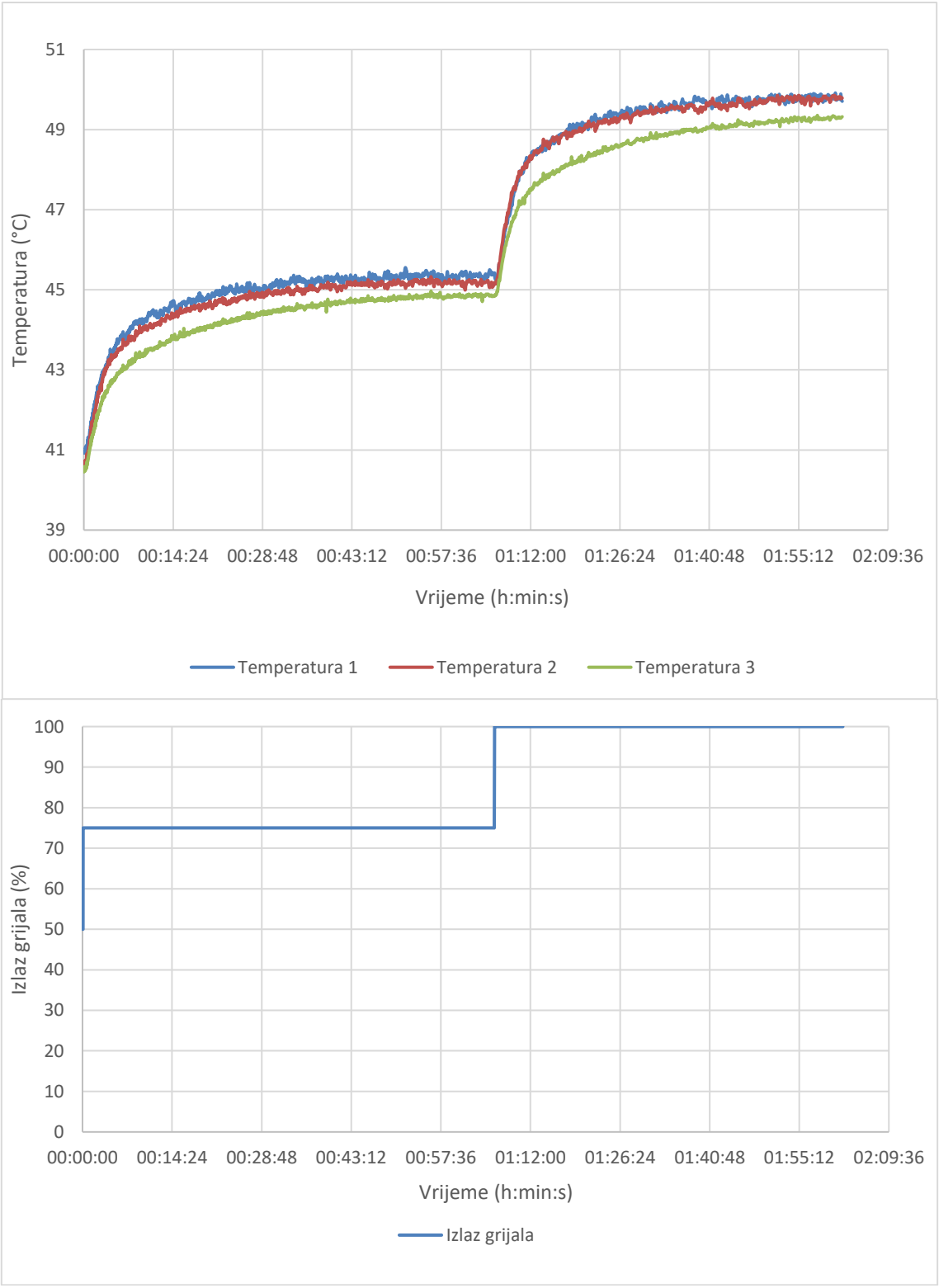


Slika 10. Odziv procesa na promjenu snage grijala od 100%

c) Odziv procesa na male promjene upravljačke varijable prema višim vrijednostima

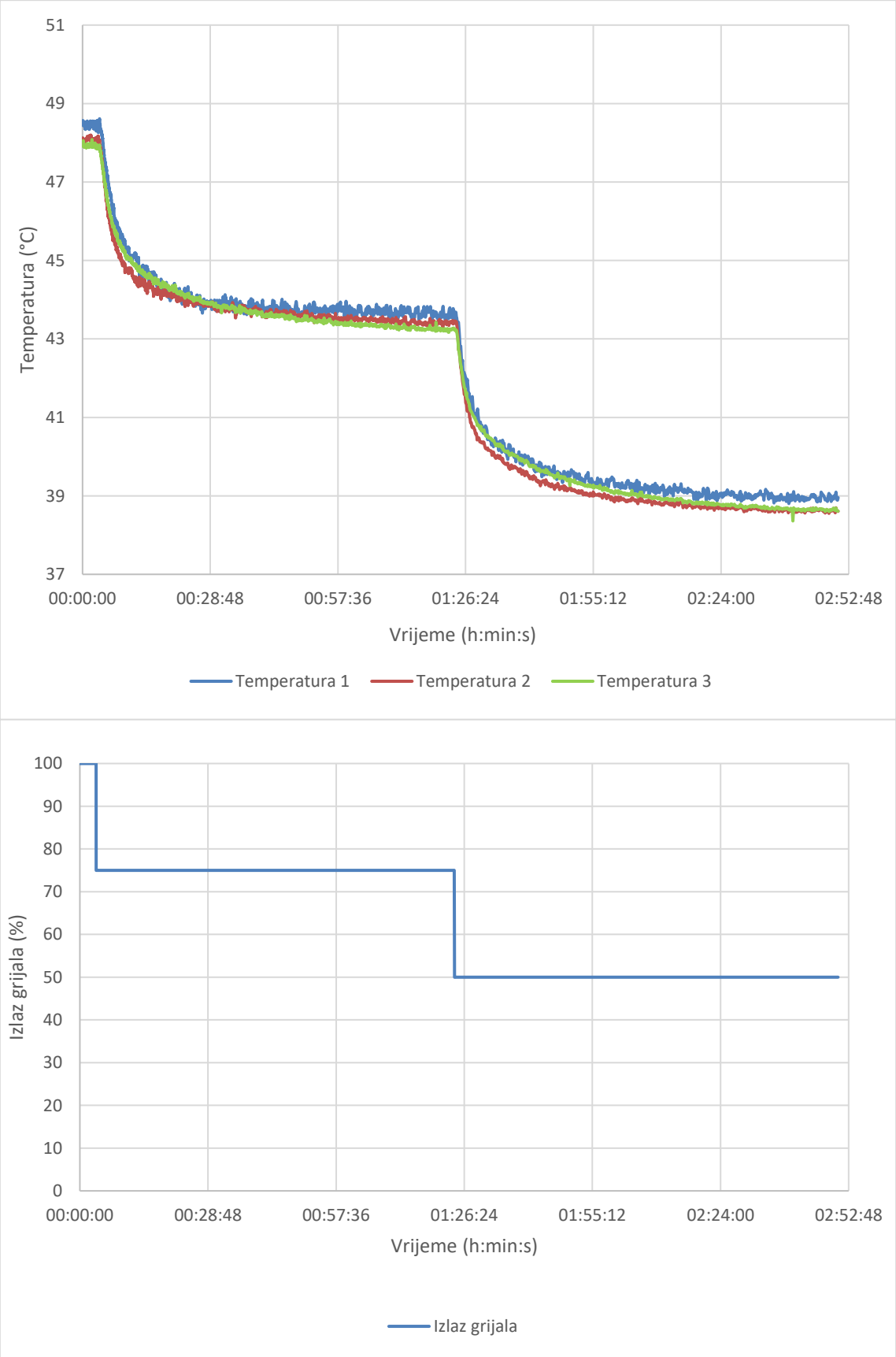


Slika 11. Odziv procesa na promjenu snage grijala s 0% na 25% i s 25% na 50%

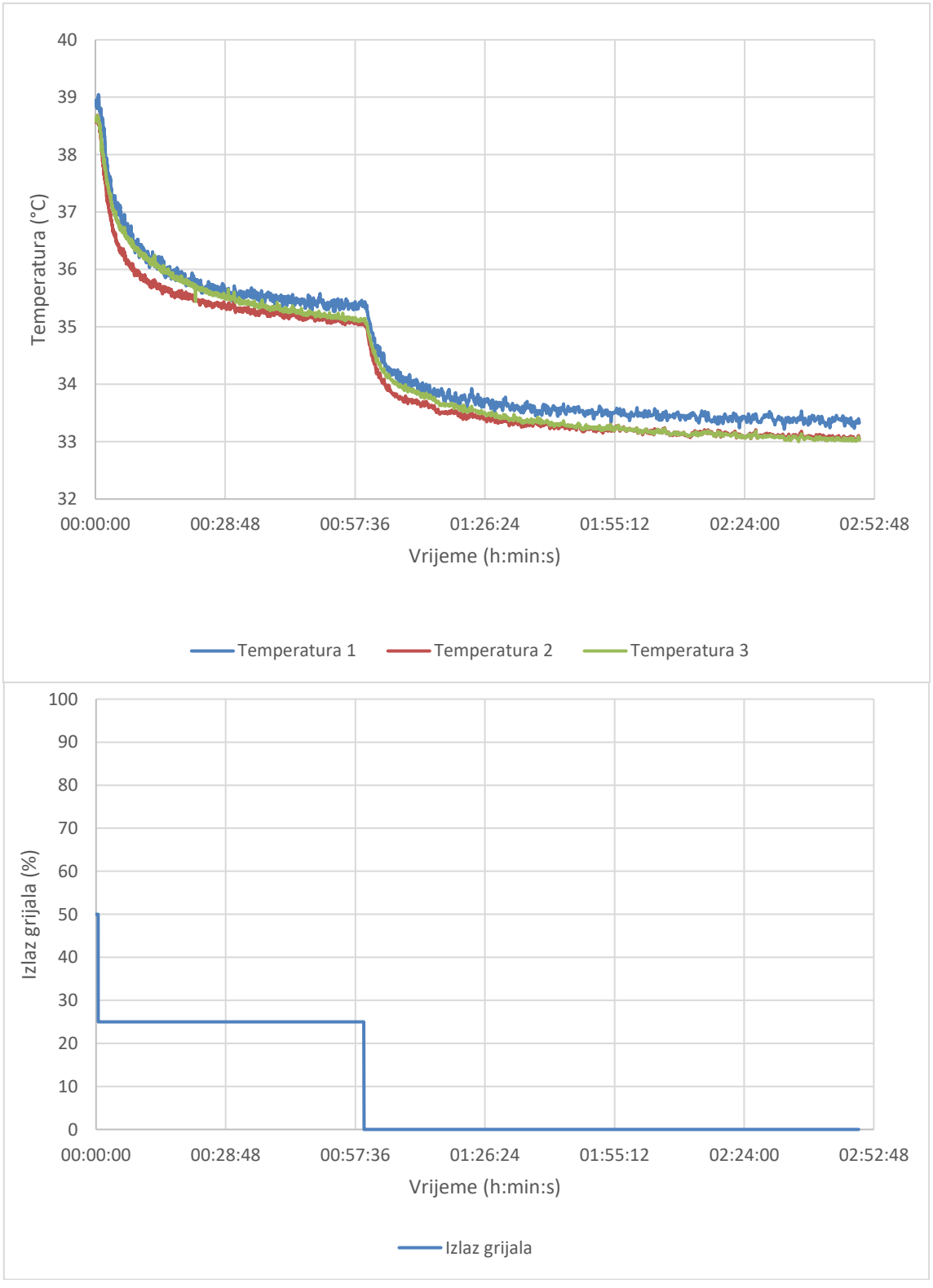


Slika 12. Odziv procesa na promjenu snage grijala s 50% na 75% i sa 75% na 100%

d) Odziv procesa na male promjene upravljačke varijable prema nižim vrijednostima



Slika 13. Odziv procesa pri promjeni snage grijala sa 100% na 75% i sa 75% na 50%



Slika 14. Odziv procesa na promjenu snage grijala s 50% na 25% i s 25% na 0%

Tablica 4. Statičke i dinamičke karakteristike procesa

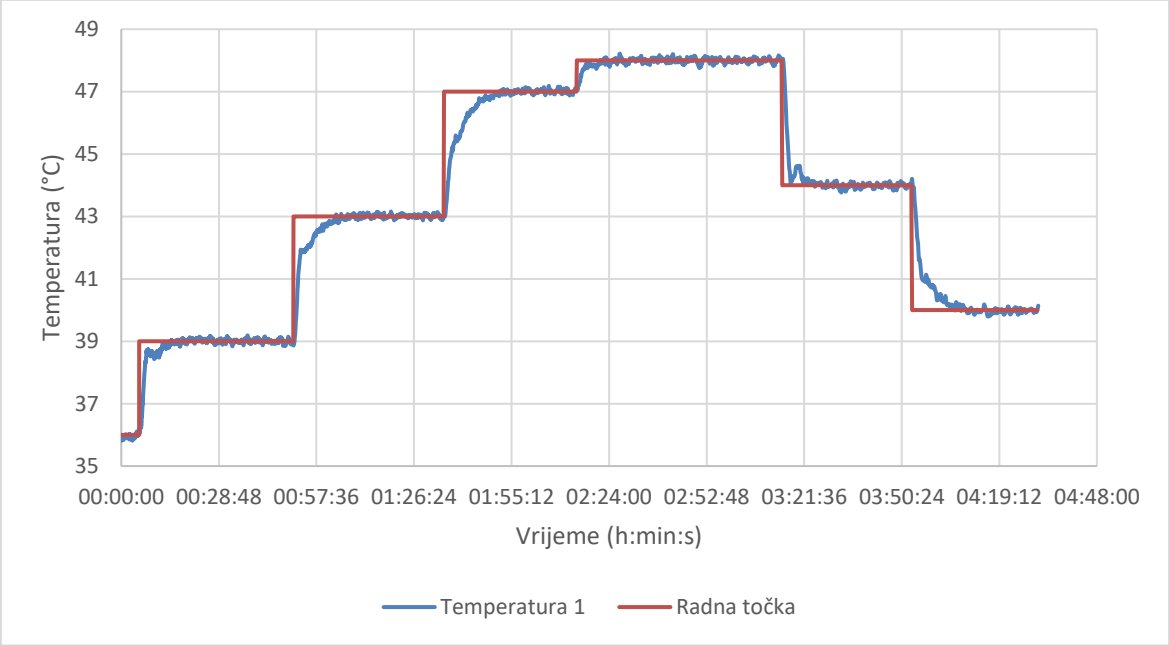
Osjetilo	Proces	Statička osjetljivost k	Vremenska konstanta τ	Mrtvo vrijeme Θ
Temperaturno osjetilo 1	Grijanje (0-100%)	0,1422 °C/%	325 s	23 s
	Grijanje (0-25%)	0,0616 °C/%	197 s	45 s
	Grijanje (25-50%)	0,1440 °C/%	266 s	30 s
	Grijanje (50-75%)	0,1784 °C/%	305 s	21 s
	Grijanje (75-100%)	0,1800 °C/%	273 s	31 s
	Hlađenje (100%-0)	0,1405 °C/%	311 s	23 s
	Hlađenje (100-75%)	0,1940 °C/%	339 s	22 s
	Hlađenje (75-50%)	0,1880 °C/%	353 s	17 s
	Hlađenje (50-25%)	0,1380 °C/%	391 s	22 s
	Hlađenje (25-0%)	0,0820 °C/%	433 s	22 s
Temperaturno osjetilo 2	Grijanje (0-100%)	0,1447 °C/%	304 s	14 s
	Grijanje (0-25%)	0,6280 °C/%	204 s	31 s
	Grijanje (25-50%)	0,1356 °C/%	239 s	21 s
	Grijanje (50-75%)	0,1800 °C/%	311 s	21 s
	Grijanje (75-100%)	0,1860 °C/%	269 s	22 s
	Hlađenje (100%-0)	0,1417 °C/%	276 s	18 s
	Hlađenje (100-75%)	0,1880 °C/%	253 s	18 s
	Hlađenje (75-50%)	0,1920 °C/%	311 s	14 s
	Hlađenje (50-25%)	0,1400 °C/%	269 s	17 s
	Hlađenje (25-0%)	0,0840 °C/%	352 s	22 s

	Proces	Statička osjetljivost k	Vremenska konstanta τ	Mrtvo vrijeme Θ
Temperaturno osjetilo 3	Grijanje (0-100%)	0,1398 °C/%	460 s	16 s
	Grijanje (0-25%)	0,0588 °C/%	256 s	38 s
	Grijanje (25-50%)	0,1332 °C/%	356 s	21 s
	Grijanje (50-75%)	0,1748 °C/%	439 s	21 s
	Grijanje (75-100%)	0,1796 °C/%	413 s	22 s
	Hlađenje (100%-0)	0,1360 °C/%	411 s	18 s
	Hlađenje (100-75%)	0,1880 °C/%	434 s	18 s
	Hlađenje (75-50%)	0,1840 °C/%	524 s	16 s
	Hlađenje (50-25%)	0,1388 °C/%	440 s	15 s
	Hlađenje (25-0%)	0,0840 °C/%	733 s	22 s

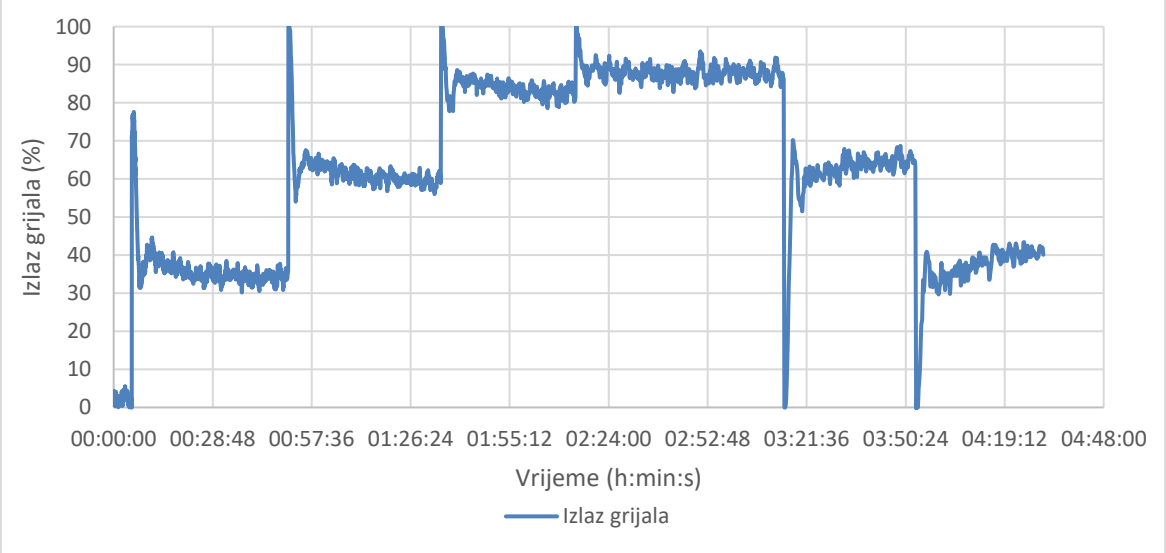
4.3 Regulacija temperature PI regulatorom

a) Regulacija parametrima dobivenima metodom pokušaja i pogreške (K_c=23,5; τ_i=4,5)

Uzimajući različite vrijednosti parametara PI regulatora odabrano je da je uz parametre K_c=23,5 i τ_i=4,5 regulacija zadovoljavajuća. Temperatura brzo postiže zadanu vrijednost bez prebačaja ili podbačaja. To je važno pri regulaciji temperature gdje su proizvodi vrlo osjetljivi na prekoračenje zadane temperature.



Slika 15. Regulacija temperature PI regulatorom (parametri određeni iskustveno)



Slika 16. Izlaz grijala pri regulaciji temperature PI regulatorom (parametri određeni iskustveno)

b) Regulacija parametrima dobivenima Ziegler-Nicholsovom metodom otvorenog kruga: (K_c =21,7; τ_i =1,27)

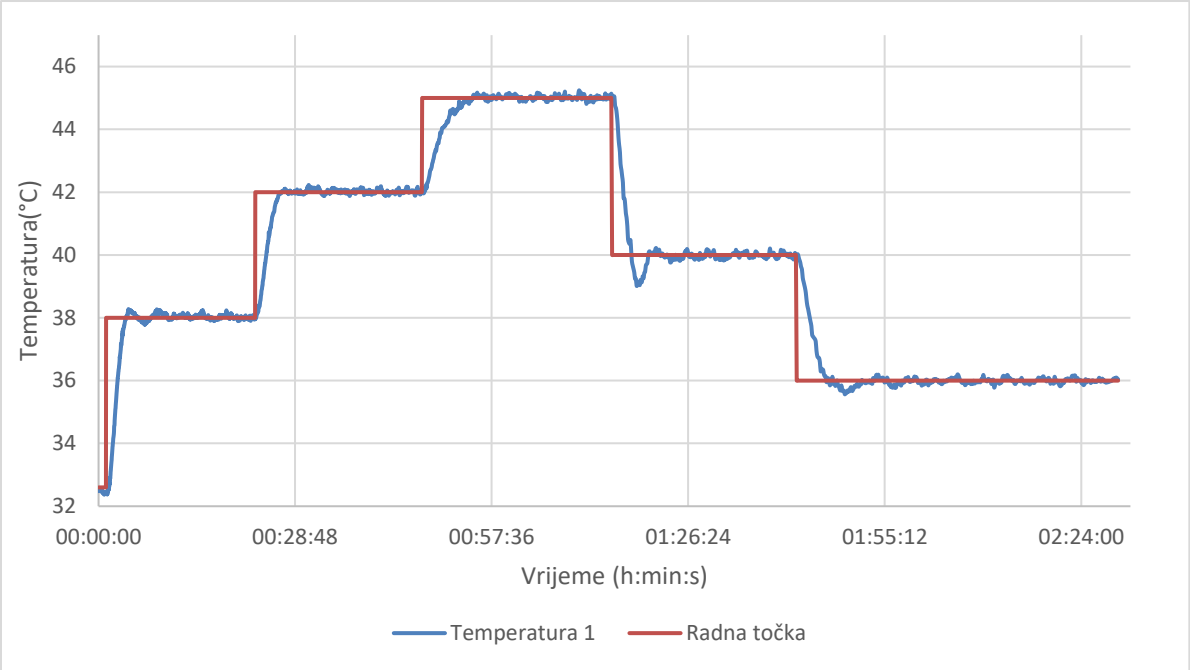
Parametri PI regulatora dobiveni Ziegler-Nicholsovom metodom otvorenog kruga određuju se iz statičkih i dinamičkih karakteristika procesa primjenom empirijskih relacija, tablica 1. Za proračun parametara uzeli su se parametri odziva na veliku promjenu upravljačke varijable, u ovom slučaju 100%.
Iz empirijskih relacija proizlazi:

$$K_c = \frac{0{,}9 \cdot 100\%}{(0{,}383\ min \cdot 10{,}85\%\ min^{-1})}$$

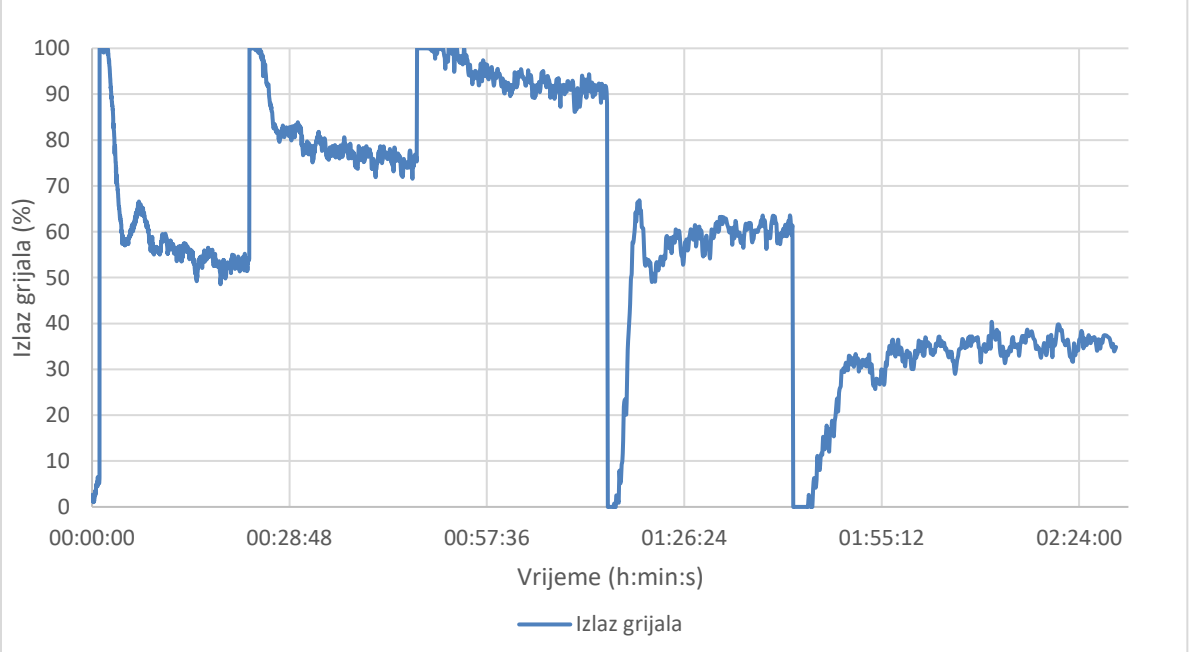
K_c =21,7

τ_i = 3,33· 0,383 min

τ_i = 1,27 min



Slika 17. Regulacija temperature PI regulatorom
(parametri određeni Ziegler-Nicholsovom metodom otvorenog kruga)



Slika 18. Izlaz grijala pri regulaciji temperature PI regulatorom
(parametri određeni Ziegler-Nicholsovom metodom otvorenog kruga)

Tablica 5. Vrijeme postizanja zadane temperature PI regulacijom

Parametri	Skok	Vrijeme postizanja zadane temperature
Iskustveni	36°C-39°C	743 s
	39°C-43°C	833 s
	43°C-47°C	1305 s
	47°C-48°C	520 s
	48°C-44°C	510 s
	44°C-40°C	740 s
Ziegler-Nichols	32,6°C-38°C	180 s
	38°C-42°C	230 s
	42°C-45°C	450 s
	45°C-40°C	180 s
	40°C-36°C	260 s

5. Rasprava

Iz proračuna se vidi da je u sustavu pri temperaturi zraka od 30 °C i prosječnoj brzini strujanja strujanje izrazito turbulentno. Reynoldsov broj u ovom sustavu iznosi Re=15 930. Prema rezultatima proračuna u cijevi se ne razvija potpuni profil brzina. Da bi se profil brzina potpuno razvio, cijev bi trebala biti duga 2,69 metara, a duljina cijevi na aparaturi je 0,60 metara. Pad tlaka u sustavu je zanemariv, jer se radi o kratkoj cijevi glatke površine. Zbog relativno male brzine strujanja možemo doći do zaključka da se u sustavu utjecaj stlačivosti može zanemariti.

Iz statičkih karakteristika procesa prikazanih u poglavlju vidljivo je da statička karakteristika blago odstupa od linearne ovisnosti pri manjim snagama grijanja. Nelinearnost procesa je izraženija na osjetilima koja su udaljenija od grijala i ventilatora. U odzivu postoji određeno mrtvo vrijeme, što je posljedica akumulirane topline u grijalu i transportnog kašnjenja. Iz odziva procesa na veliku promjenu upravljačke varijable vidi se da je odziv najbrži na drugom osjetilu, a najsporiji na trećem osjetilu. Također je ukupna temperaturna promjena najveća na drugom, a najmanja na trećem osjetilu. Iz teoretskih postavki za očekivati je da će odziv biti najbrži na prvom osjetilu. To ovdje nije slučaj zbog nerazvijenog profila brzina i izvedbe grijala, pri čemu vjerojatno dolazi do obilaženja strujnica zraka oko prvog osjetila. Iz istog razloga je i mrtvo vrijeme na prvom osjetilu veće nego na druga dva osjetila. Odzivi na trećem osjetilu su očekivani jer se to osjetilo nalazi najdalje od grijala i ventilatora. Hlađenje je pri najvećoj promjeni upravljačke varijable brže od grijanja.

Iz odziva procesa na promjenu snage grijala od 25 % prema višim vrijednostima može se uočiti da je odziv najbrži na drugom osjetilu, a najsporiji na trećemu. Pri istoj promjeni snage grijala, veće se razlike temperatura dobivaju pri višim temperaturama. Iz odziva procesa na promjenu snage grijala od 25 % prema nižim vrijednostima može se uočiti da je odziv također najbrži na drugom osjetilu, a najsporiji na trećemu. Pri hlađenju se također uočava nelinearnost procesa.

Metodom pokušaja i pogreške dobiveni su parametri koji regulaciju čine sporijom nego parametri dobiveni Ziegler-Nichols metodom otvorenog kruga, ali je temperatura stabilnija oko zadane vrijednosti. Kod regulacije parametrima određenim Ziegler-Nichols metodom također dolazi do blagog prebačaja i većeg podbačaja zadane vrijednosti na početku regulacijskog djelovanja.

To može biti problem pri regulaciji temperature u industriji ako su proizvodi osjetljivi na temperaturu. Također se vidi da se izlaz grijala agresivnije mijenja kod korištenja parametara određenih Ziegler-Nichols metodom otvorenog kruga. U ovom sustavu to ne utječe nepovoljno na izvršnu spravu jer se sustav grije električnim grijalom, ali bi u sustavu s regulacijskim ventilom ili pumpom s promjenjivim brojem okretaja to utjecalo na servisni vijek opreme.

6. Zaključak

Analizom procesa prijenosa topline zaključilo se da se radi o približnom odzivu procesa prvog reda. Iz provedenih mjerenja može se zaključiti da je proces prijenosa topline u sustavu očekivano trom.

Statičke karakteristike procesa na osjetilima su približno linearane. Manja odstupanja od linearnosti nisu utjecala na kvalitetu regulacije temperature. Odstupanja od teorijskih očekivanja statičkih i dinamičkih karakteristika posljedica su izvedbe aparature.

Za poučavanje studenata kemijskog inženjerstva analizi dinamike i vođenju procesa preporuča se ugradnja manjega grijala koje će se brže zagrijavati i hladiti, i koje ne utječe na karakteristike sustava. Time će se ostvariti brža provedba vježbi i mogućnost provedbe većeg broja pokusa u zadanom vremenu.

7. Popis simbola i oznaka

A	površina grijala
a	koeficijent temperaturne vodljivosti
c	brzina zvuka
c_p	posebni toplinski kapacitet
CV	vođena varijabla
d_{ekv}	ekvivalentni promjer
DV	poremećaj
e	pogreška
k	statička osjetljivost
l	duljina cijevi
L_e	hidrodinamička duljina ulaza
Ma	Machov broj
MV	upravljana varijabla
O	opseg presjeka
OP	upravljačka veličina
P	površina poprečnog presjeka
P_g	snaga grijala
PV	mjerena veličina
q_{konv}	toplina prenesena konvekcijom
Re	Reynoldsov broj
SP	radna točka
T_g	temperatura grijala
T_n	temperatura na osjetilu
T_o	temperatura okoline

T_z temperatura zraka

U_v napon ventilatora

v brzina gibanja

$\dot{V}$ volumni protok

Grčki alfabet

α koeficijent prijenosa topline

δ_h debljina hidrodinamičkoga graničnog sloja

Δp pad tlaka

$\frac{\varepsilon}{d}$ relativna hrapavost

ζ koeficijent prigušenja

η dinamička viskoznost

Θ mrtvo vrijeme

λ koeficijent toplinske vodljivosti

ρ gustoća

τ vremenska konstanta

8. Literatura

[1] A. Glasnović., A. Sander., Prijenos tvari i energije, str. 22.-23., 93.-94.

[2] N. Bolf., Predavanje, Analiza procesa; Dinamičko vladanje procesa , predavanja iz kolegija: Mjerenje i vođenja procesa, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, 2017.

[3] N. Bolf., Uvodno predavanje, predavanja iz kolegija: Mjerenje i vođenje procesa, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, 2017.

[4] J. Božičević., Temelji automatike 1: Sustavno gledište i automatika, automatsko reguliranje, Zagreb 1988., str.105-106.

[5] Korištenje internetom https://www.west-cs.com/news/what-is-a-temperature-control-system/ (pristup: kolovoz, 2018.)

[6] Korištenje internetom https://www.omega.com/prodinfo/temperaturecontrollers.html (pristup: kolovoz, 2018.)

[7] N. Bolf., prezentacija, Ziegler-Nichols metoda otvorenog kruga, Laboratorij za automatiku i mjerenja, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu

Životopis

Domagoj Bošnir [redacted] Pohađao je Osnovnu školu Matije Gupca u Zagrebu, gdje je završio i Prirodoslovno matematičku gimnaziju „Ivan Supek”. Godine 2014. upisao je Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, studij Kemijsko inženjerstvo. Stručnu praksu odradio je u INA d.d. u Centralnom ispitnom laboratoriju.