

Automatska regulacija temperature modela rashladne komore

Županić, Kristijan

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, FACULTY OF FOOD TECHNOLOGY / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:109:199667>

Rights / Prava: [Attribution-ShareAlike 4.0 International / Imenovanje-Dijeli pod istim uvjetima 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-03**

REPOZITORIJ

PTF OS

PREHRAMBENO-TEHNOLOŠKI FAKULTET OSIJEK

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Food Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
PREHRAMBENO-TEHNOLOŠKI FAKULTET OSIJEK**

Kristijan Županić

**AUTOMATSKA REGULACIJA TEMPERATURE MODELA
RASHLADNE KOMORE**

DIPLOMSKI RAD

Osijek, rujan 2024.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

DIPLOMSKI RAD

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek

Sveučilišni diplomski studij Procesnog inženjerstva

Zavod za Procesno inženjerstvo

Katedra za Modeliranje, optimiranje i automatizaciju

Franje Kuhača 18, 31000 Osijek, Hrvatska

Znanstveno područje: Biotehničke znanosti

Znanstveno polje: Prehrambena tehnologija

Tema rada prihvaćena je na X. redovitoj sjednici Fakultetskog vijeća Prehrambeno-tehnološkog fakulteta Osijek održanoj 24. srpnja 2024. godine.

Mentor: izv. prof. dr. sc. *Frane Čačić Kenjeric*

Komentor:

Automatska regulacija temperature modela rashladne komore

Kristijan Županić, 0113145719

Sažetak:

U ovom radu prikazan je postupak izrade modela rashladne komore s PID regulacijom temperature. Model komore dimenzija 200 mm x 200 mm x 200 mm s unutrašnjim volumenom od 1L izrađen je od ekstrudiranog polistirena (XPS) debljine 50 mm. Sustav automatizacije komore izrađen je pomoću Arduino UNO R3 mikroupravljača, mjernih pretvornika temperature DS18B20, Peltierovih elemenata TEC1-12706, LCD zaslona i mikroprekidača. Na temelju provedenih mjerenja, određena je prijelazna karakteristika modela komore, te je izvršeno parametarsko optimiranje PID regulatora primjenom empirijske metode sinteze prema Chien-Hrones-Reswick-u. Razvijeni sustav regulira željenu temperaturu u komori od $-20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$. Razvijeni model pogodan je za edukacijske svrhe i simulaciju rada termoelektričnih rashladnih sustava te primjene PID regulatora za automatsku regulaciju temperature.

Ključne riječi: *PID regulator, Peltierovi elementi, automatska regulacija temperature, rashladna komora*

Rad sadrži: 44 stranica

21 slika

1 priloga

26 literaturnih referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Sastav Povjerenstva za ocjenu i obranu rada:

1.	prof. dr. sc. <i>Darko Velić</i>	predsjednik
2.	izv. prof. dr. sc. <i>Frane Čačić Kenjeric</i>	član - mentor
3.	prof. dr. sc. <i>Sandra Budžaki</i>	član
4.	doc. dr. sc. <i>Krunoslav Aladić</i>	zamjena člana

Datum obrane: 30. rujna 2024.

Rad je u tiskanom i elektroničkom (pdf format) obliku pohranjen u Knjižnici Prehrambeno-tehnološkog fakulteta Osijek, Franje Kuhača 18, Osijek.

BASIC DOCUMENTATION CARD

GRADUATE THESIS

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek

Faculty of Food Technology Osijek

University Graduate Study of Process Engineering

Department of Process Engineering

Subdepartment of Modeling, Optimization and Automation

Franje Kuhača 18, HR-31000 Osijek, Croatia

Scientific area: Biotechnical sciences

Scientific field: Food Technology

Thesis subject was approved by the Faculty Council of the Faculty of Food Technology at its session no. X. held on 24. July 2024.

Mentor: Frane Čačić Kenjeric, assoc. prof.

Co-mentor: -

Automatic temperature regulation of chilling chamber model

Kristijan Županić, 0113145719

Summary:

This paper presents the process of creating a model of a cooling chamber with PID temperature regulation. The chamber model, with dimensions of 200 mm x 200 mm x 200 mm and an internal volume of 1L, is made of extruded polystyrene (XPS) with a thickness of 50 mm. The chamber automation system was made using an Arduino UNO R3 microcontroller, DS18B20 temperature transducers, TEC1-12706 Peltier elements, LCD display and microswitches. Based on the measurements, the transient characteristic of the chamber model was determined, and the parametric optimization of the PID controller was performed using the empirical synthesis method according to Chien-Hrones-Reswick. The developed system regulates the desired temperature in the chamber of $-20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$. The developed model is well-suited for educational purposes, specifically for simulating the operation of thermoelectric cooling systems and demonstrating the application of PID controllers in automatic temperature regulation.

Key words: *PID regulator, Peltier element, temperature automatic regulation, cooling chamber*

Thesis contains: 44 pages

21 figures

1 supplementary material

26 references

Original in: Croatian

Review and defence committee:

- | | | |
|----|--|----------------------------|
| 1. | <i>Darko Velić</i> , PhD, prof. | chair person |
| 2. | <i>Frane Čačić Kenjeric</i> , PhD, associate prof. | member - supervisor |
| 3. | <i>Sandra Budžaki</i> , PhD, prof. | member |
| 4. | <i>Krunoslav Aladić</i> , PhD, assistant prof. | stand-in |

Defence date: 30. September 2024.

Printed and electronic (pdf format) version of thesis is deposited in Library of the Faculty of Food Technology Osijek, Franje Kuhača 18, Osijek.

DIPLOMSKI RAD JAVNO JE OBRANJEN DANA

30. 9. 2024.

TE OCIJENJEN USPJEHOM

izvrstnim (5)

Pred Povjerenstvom za obranu diplomskog rada:

1. **prof. dr. sc. Darko Velić** predsjednik



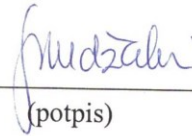
(potpis)

2. **izv. prof. dr. sc. Frane Čačić Kenjerić** član - mentor



(potpis)

3. **prof. dr. sc. Sandra Budžaki** član



(potpis)

Sadržaj

Popis oznaka, kratica i simbola	7
1. UVOD.....	1
2. TEORIJSKI DIO.....	3
2.1.1 Toplina	4
2.2. Mehanizmi prijenosa topline	6
2.2.1 Kondukcija.....	6
2.2.2 Konvekcija.....	7
2.2.3 Zračenje	7
2.2.4 Proces odvođenja topline (hlađenje)	8
2.3. Rashladne komore	9
2.3.1 Podjela rashladnih komora (hladnjače/zamrzivači)	9
2.3.2 Automatska regulacija PID regulator	9
2.4. Termoelektrični efekt	12
2.4.1 Seebeckov efekt	12
2.4.2 Peltierov efekt	13
2.4.3 Thomsonov efekt	13
2.5. Hlađenje pomoću termoelektričnih uređaja.....	14
3. EKSPERIMENTALNI DIO	15
3.1. Zadatak	16
3.2. Materijali i metode	16
3.2.1 Konstrukcija komore.....	16
3.2.2 LCD zaslon 2004 LCD	17
3.2.3 Tipkala (mikroprekidači)	18
3.2.4 Mjerni pretvornik temperature DS18B20	19
3.2.5 Ploča za prototipiranje "Breadboard"	20
3.2.6 Arduino UNO R3 i Arduino IDE razvojna okolina	21
3.2.7 TEC1-12706.....	22
4. REZULTATI I RASPRAVA	23
4.1. Model komore	24

4.2.	Sustav hlađenja komore.....	26
4.3.	Električna shema sustava.....	28
4.4.	Programsko rješenje i PID regulacija temperature	29
4.5.	Parametarsko optimiranje PID regulatora	32
5.	ZAKLJUČCI.....	35
6.	LITERATURA	37
7.	PRILOZI	40

Popis oznaka, kratica i simbola

A - površina presječnog područja [m^2]

α – Seebeck-ov koeficijent [μVK^{-1}]

c_p - specifični toplinski kapacitet [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]

ΔT – razlika temperatura [$^{\circ}\text{C}$, $^{\circ}\text{K}$]

Δx - udaljenost [m]

ε - Emitivnost površina tijela

h - koeficijent prijenosa topline [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]

k - vodljivost materijala [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]

m – masa [kg]

σ - Stefan-Boltzmannova konstanta [Wm^{-2}K^4]

Q - Toplina [J]

1. UVOD

Sustavi hlađenja ključni su za sprječavanje prekomjernog zagrijavanja uređaja i struktura, čime se osigurava njihova učinkovitost i sigurnost. Primjenjuju se u raznim područjima, od nuklearnih reaktora i automobila do industrijske opreme i strojeva.

U prehrambenoj industriji, sustavi hlađenja imaju posebnu važnost jer omogućuju povećanje trajnosti i sigurnosti hrane za konzumaciju tijekom cijelog lanca opskrbe. Kontrola temperature u ovom procesu osigurava optimalne uvjete skladištenja, čime se sprječava kvarenje i očuvava sigurnost hrane.

Stoga je pravilno projektiranje, održavanje i nadzor rashladnih sustava od ključne važnosti za brojne industrije i primjene (Encyclopædia Britannica, Inc, 2024).

Cilj ovog rada je izrada funkcionalnog modela rashladne komore s automatskom regulacijom temperature. Regulator je izveden na Arduino Uno R3 razvojnoj pločici implementacijom upravljačkog algoritma u programu mikroupravljača.

2. TEORIJSKI DIO

2.1.1 Toplina

Toplina je energija koja se prenosi s jednog tijela na drugo kada postoji razlika u temperaturi, pri čemu je temperatura mjera količine toplinske energije koju takav sustav posjeduje. Energija, to jest toplina, uvijek se prenosi s tijela s višom temperaturom na tijelo s nižom temperaturom, što je poznato kao drugi zakon termodinamike (Qiu i Feng, 2024).

Sam prijenos topline, odnosno izmjena energije, provodi se sve dok se ne izjednače temperature oba tijela (sustava), odnosno dok se ne postigne toplinska ravnoteža. Na **Slika 1** prikazan je prijenos topline s tijela više temperature T_k , šalice vruće kave na hladniju okolinu T_o .



Slika 1 Prijenos topline s toplijeg tijela na hladniju okolinu (Çengel, 2006).

Prijenos topline je moguć i bez promjene temperature radne tvari u uvjetima promjene agregatnog stanja tvari što se događa u slučaju isparavanja i kondenzacije te se u tom slučaju izmijenjena toplina definira kao latentna toplina. Količinu topline koju neko tijelo može pohraniti ili sadržavati u određenom trenutku, osim o temperaturi, ovisi i o vrsti tvari od koje je tijelo načinjeno i masi radne tvari m , množini radne tvari n te volumenu radne tvari V . Veličina s kojom se iskazuje navedeno svojstvo naziva se specifični toplinski kapacitet ili specifična toplina c i izražava se u $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (masena specifična toplina), $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (molarna specifična toplina) i $\text{J} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{K}^{-1}$ (volumna specifična toplina). Zbog toga se specifični toplinski kapacitet smatra toplinskim svojstvom tvari. Specifični toplinski kapacitet se definira kao količina topline koju je potrebno dovesti ili odvesti jedinici količine tvari da bi joj se temperatura promijenila za 1° .

Specifični toplinski kapacitet ne ovisi samo o navedenim parametrima već i o uvjetima u kojima se odvija izmjena topline. Ukoliko se proces odvija u uvjetima konstantnog tlaka vrijednost

specifičnog toplinskog kapaciteta označava se kao c_p , a ukoliko se proces odvija u uvjetima konstantnog volumena kao c_v .

Mjerne jedinice za iskazivanje količine energije u međunarodnom sustavu jedinica (SI sustav), pa tako i topline, jest Joule (J). Joule je izvedena mjerna jedinica koja se još može prikazati kao $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m}$, ili u osnovnim jedinicama SI sustava kao $\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$ (Državni zavod za mjeriteljstvo, 2015). Jedinica je dobila naziv prema engleskom fizičaru Jamseu Prescottu Joule-u zbog značajnog doprinosa termodinamici. U Velikoj Britaniji, pored metričkog sustava koristi se paralelno i imperijalni sustav jedinica, gdje se toplina iskazuje u britanskim toplinskim jedinicama [BTU] (British Thermal Unit). Jedinica BTU je definirana kao količina topline potrebne da se temperatura jedne funte [lb] vode poveća za jedan stupanj Farenhajta [1°F] s 68°F (Kreith i sur., 2011). Njena vrijednost iznosi približno $1\,055,056 \text{ J}$. Danas se u pojedinim granama znanosti još (npr. u nutricionizmu) koristi kalorija [cal] kao mjerna jedinica energije (energetske vrijednosti), a jedna kalorija iznosi $4,184 \text{ J}$. Količina topline od 1 cal je dostatna da zagrije 1 g vode za 1°K (ili $^\circ\text{C}$). Kako su Joule-i [J] i kalorije [cal] relativno male jedinice često se koriste kao decimalne jedinice s odgovarajućim prefiksima, pa se toplina češće iskazuje u kJ, MJ ili kcal.

Količina topline koja prelazi s toplijeg tijela na hladniju okolinu (ili obratno) Q [J], u slučaju kada se toplina ne pretvara u rad, za zatvorene sustave ovisi o masi tvari m [kg], specifičnom toplinskom kapacitetu c_p [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] i razlici temperatura ΔT [K] kako je prikazano u jednadžbi (1).

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \text{ [J]} \quad (1)$$

2.2. MEHANIZMI PRIJENOSA TOPLINE

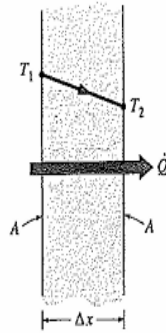
Postoje tri osnovna načina prijenosa topline kondukcija, konvekcija i radijacija. Koji od ovih mehanizama će dominirati ili uopće neće doprinosti prijenosu topline ovisi o više čimbenika, kao što je agregatno stanje tvari promatranog sustava (krutine ili fluidi) odnosno postojanje ili odsustvo medija za prijenos topline. Prijenos topline, bez obzira na mehanizam prijenosa, moguć je isključivo u uvjetima gdje postoji odgovarajući temperaturni gradijent, ΔT .

2.2.1 Kondukcija

Kondukcija je mehanizam prijenosa topline gdje se između tijela koja su u neposrednom dodiru toplina prenosi sa tijela koje posjeduje više topline prema neposredno postavljenom tijelu koje je na nižem energetsom nivou. Mehanizam prijenosa topline kondukcijom prevladava u krutinama dok je u tekućinama i plinovima manje zastupljen. Prijenos topline kondukcijom u fluidima provodi se kao posljedica sudara čestica zbog nasumičnog kretanja, dok se prijenos topline kondukcijom u krutinama odvija kombinacijom različitih brzina titranja susjednih molekula oko ravnotežnog položaja te transporta energije slobodnim elektronima (Çengel, 2006).

Na **Slici 2.** prikazan je prijenos topline Q [J] kondukcijom kroz krutu stijenku debljine Δx [m], površine A [m²], pri čemu njezine dvije površine imaju različite temperature T_1 [K] i T_2 [K], uz uvjet $T_1 > T_2$. Intenzitet (brzina) prijenosa topline ovisit će o debljini stjenke, površini i materijalu od kojeg je napravljena stijenka odnosno njegovom koeficijentu toplinske vodljivosti k [Wm⁻¹K⁻¹] (Çengel, 2006). Intenzitet prijenosa topline (toplinski fluks) može se izračunati pomoću jednadžbe (2) koja je poznata kao Fourierov zakon vođenja topline u čast francuskog znanstvenika J. B. J. Fouriera (1768. – 1830.) koji ju je predložio 1822. godine (Kreith i sur., 2011).

$$Q = -k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (\text{W}) \quad (2)$$



Slika 2 Prolaz topline kroz stjenku (kondukcija) (Çengel, 2006)

2.2.2 Konvekcija

Konvekcija je mehanizam prijenosa topline unutar mase fluida koji struji te se ujedno odvija i sa čvrste stijenke na masu fluida koji struji uz čvrstu stijenku. U slučaju prijenosa topline sa čvrste stijenke na fluid s kojim je u kontaktu, u početku dominira kondukcija dok fluid ne počne strujati zbog razlike u gustoći uslijed zagrijavanja kada se glavina prijenosa topline odvija konvekcijom. Konvekcija, ovisno o načinu strujanja fluida, može biti prirodna ili prinudna. U slučaju prirodne konvekcije fluidu se kao posljedica zagrijavanja smanjuje gustoća te spontano struji suprotno od smjera gravitacije udaljavajući se od izvora topline. Nasuprot tome u slučaju prinudne konvekcije strujanje fluida potiče se mehanički pomoću uređaja kao što su ventilatori, pumpe ili miješalice (Çengel, 2006). Stopa prijenosa topline konvekcijom je proporcionalna razlici temperature i opisana je Newtonovim zakonom hlađenja predstavljenim jednadžbom (3):

$$Q_{konv} = h \cdot A \cdot \Delta T \text{ (W)} \quad (3)$$

Gdje su:

h - koeficijent prijenosa topline [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]

A – površina [m^2]

ΔT –razlika temperature.

2.2.3 Zračenje

Zračenje je mehanizam prijenosa energije gdje se energija prenosi u obliku elektromagnetskih valova. Zračenje je najbrži način prijenosa topline (energije). Za razliku od kondukcije i konvekcije, gdje je nužno da postoji medij preko kojeg se energija prenosi, prijenos energije putem zračenja ne ovisi o prisutnosti medija. Maksimalna količina energije koju crno tijelo

može predati u okolinu zračenjem pri danoj temperaturi definirana je Stefan-Boltzmanovim zakonom, jednadžba (4). (Çengel, 2006)

$$Q_{max} = \sigma A_s T_s^4 \text{ [W]} \quad (4)$$

Gdje σ predstavlja Stefan-Boltzmannovu konstantu koja iznosi $5,670 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^4$, $A_s \text{ [m}^2\text{]}$ površinu i $T_s \text{ [K]}$ temperaturu površine tijela. Sva ostala, realna ili siva tijela zrače manju količinu energije jer imaju manju emisivnost $\varepsilon < 1$ od crnog tijela. Zračenje realnog tijela definirano je jednadžbom (5).

$$Q_{max} = \sigma \varepsilon A_s T_s^4 \text{ [W]} \quad (5)$$

2.2.4 Proces odvođenja topline (hlađenje)

Hlađenje se definira kao proces uklanjanja topline iz sustava, što rezultira smanjenjem temperature hlađenog prostora, robe ili predmeta. Osim toga, smanjenje temperature postignuto na bilo koji drugi način također se može opisati kao hlađenje. Prirodno hlađenje odvija se spontano jer tijelo s temperaturom T , a koja je viša od temperature okoline, teži postići ravnotežu s okolinom temperature T_o . Radi jednostavnosti uzima se da su temperatura tijela i temperatura okoline konstantne za vrijeme izmjene topline Q . Osim prirodnog hlađenja postoji i procesno hlađenje koje se provodi kada je potrebno tijelo ohladiti na temperaturu ispod temperature okoline, uz odvođenje topline što se provodi pomoću različitih rashladnih uređaja (Carta, 2021). U procesnoj industriji s ciljem provođenja hlađenja radne tvari primjenjuju se različiti uređaji kao što su: rashladni tornjevi, pločasti i cjevasti izmjenjivači topline i drugo.

2.3. RASHLADNE KOMORE

Rashladna komora je struktura koja je obložena slojem materijala koji je otporan na vlagu i pruža toplinsku izolaciju te može biti podijeljena na nekoliko komora, a temperatura u svakoj se održava pomoću odgovarajuće opreme. Za male privatne rashladne komore ili skladišta za hlađenje različite robe, zidovi, podovi i stropovi moraju biti izrađeni od čvrstih materijala kako bi se osigurala maksimalna učinkovitost (Seaton i sur. 1956). Kompresor, kondenzator, ekspanzijski ventil i isparivač osnovne su komponente rashladnih uređaja koji su sastavni dio rashladnih komora. Osim ovih osnovnih komponenata, važan element je i termostat, koji se koristi za podešavanje željene temperature. Za praćenje temperature unutar komore koristi se temperaturni senzor koji kontinuirano prati temperaturu u komori. Na temelju razlike temperature unutar komore i zadane temperature putem termostata rashladni uređaj u sastavu rashladne komore se pali i gasi (Ebenezer i sur., 2021).

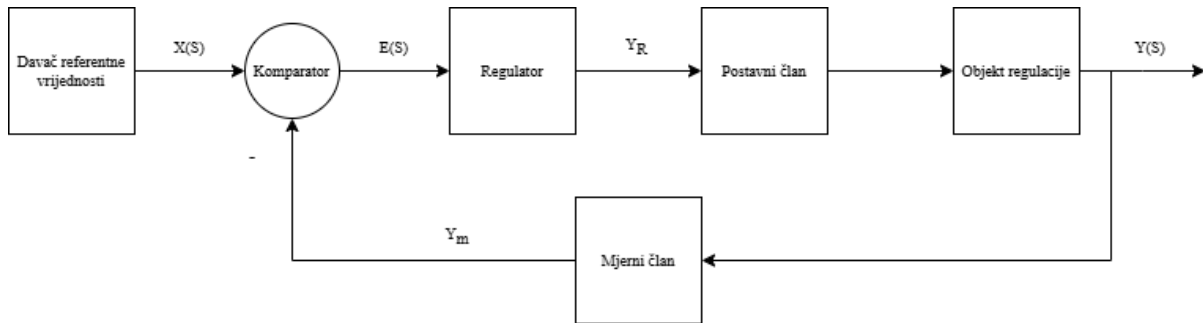
2.3.1 Podjela rashladnih komora (hladnjače/zamrzivači)

Postoje dvije osnovne vrste rashladnih komora: komore za zamrzavanje i prostorije za hlađenje. Rashladne komore, poznate i kao prostorije za hlađenje, često se koriste za pohranjivanje svježe hrane njihovo hlađenje te održavanje željene temperature, obično između 0 °C i 10 °C. Komore za zamrzavanje (mrazne komore) koriste se za zamrzavanje hrane ili čuvanje biološkog materijala na duže vrijeme. Njihov prosječni temperaturni raspon kreće se između -28 °C i 0 °C, a ponekad su projektirane za rad i na nižim temperaturama od spomenutih.

2.3.2 Automatska regulacija PID regulator

Automatska regulacija predstavlja ključni aspekt modernih tehničkih sustava, omogućujući precizno upravljanje različitim procesima i sustavima. Temeljni princip automatske regulacije je povratna veza, koja omogućuje sustavu da prilagodi svoje ponašanje na temelju odstupanja od željenog stanja. Opća funkcionalna shema sustava automatske regulacije s povratnom vezom prikazana je na **Slika 3**. Ovaj koncept nije ograničen samo na tehničke sustave, već se primjenjuje i u biološkim, ekonomskim, socijalnim i drugim sustavima. Povijesno gledano, razvoj automatske regulacije započeo je s jednostavnim mehaničkim regulatorima, kao što je Wattov centrifugalni regulator za parne strojeve (Perić, 2012). S razvojem elektronike i računalne tehnologije, automatska regulacija je postala sofisticiranija, omogućujući primjenu složenih algoritama i modela za optimizaciju performansi sustava (Gamba et al., 2015; Tyagi et al., 2021; Wagner, 2003). U suvremenom kontekstu, automatska regulacija igra ključnu

ulogu u različitim industrijama, uključujući energetiku, proizvodnju, transport i medicinu (Jovane i sur., 2003; Mathew i sur., 2023; Murugesan, 2006).

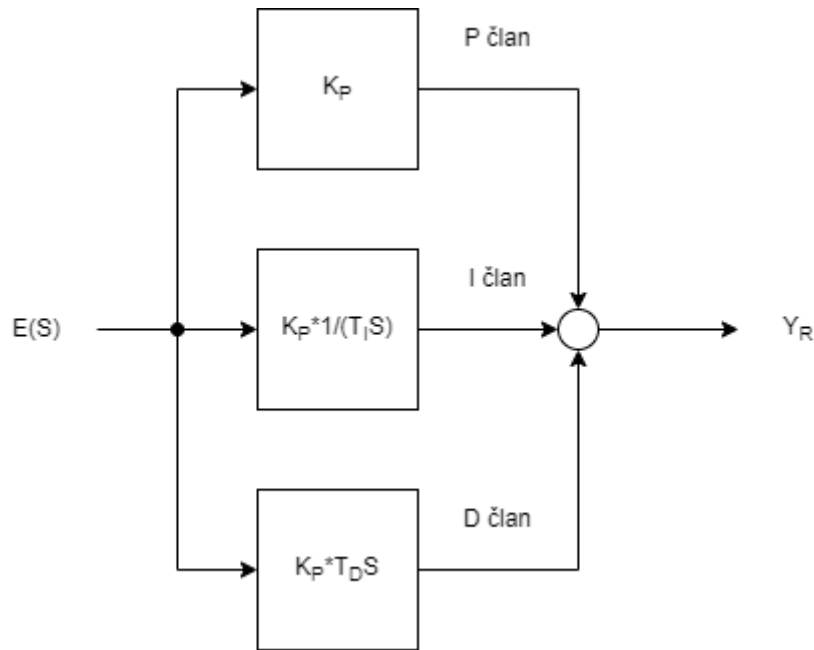


Slika 3 Opća funkcionalna shema sustava automatske regulacije (osobna arhiva)

Klasični regulatori (P, PI, PD i PID) sastavljeni od proporcionalnog (P), integracijskog (I) i derivacijskog (D) člana su temeljni elementi u automatskim upravljačkim sustavima, omogućujući precizno upravljanje različitim procesima. Među njima, proporcionalno-integralno-derivacijski (PID) regulator je najčešće korišten zbog svoje jednostavnosti i učinkovitosti (McMillan, 2012). Regulatori, pa tako i PID, radi na temelju signala regulacijskog odstupanja $e(t)$ u vremenskom području, odnosno $E(S)$ u kompleksnom području, koji nastaje u komparatoru usporedbom željenog iznosa $X(S)$ i izmjerene trenutne vrijednosti $Y(S)$ regulirane veličine. Izlazni, regulirajući signal Y_R regulator tvori tako da ulazni signal, regulacijskog odstupanja $E(S)$, „propusti“ kroz proporcionalni, integralni i derivacijski član, te njihove rezultate zbroji, kao je prikazano na **Slika 4**. Prijenosna funkcija PID regulatora može se prikazati pomoću jednadžbe (6), iz koje možemo i izraziti izlazni signal $Y_R(S)$ (7).

$$G_{PID}(S) = \frac{Y_R(S)}{E(S)} = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I S} + T_D S \right) \quad (6)$$

$$Y_R(S) = K_P E(S) + K_I \frac{1}{S} E(S) + K_D S E(S) \quad (7)$$



Slika 4 Struktura PID regulatora (osobna arhiva)

Iz jednadžbi (6) i (7) proizlazi da PID regulator ima tri podesiva parametra, K_P konstantu pojačanja P elementa, T_I integralnu vremensku konstantu (ili $K_I = K_P T_I^{-1}$) i T_D derivacijsku vremensku konstantu (ili $K_D = K_P T_D$). Proporcionalni element daje brzinu reakcije regulatoru, integralni element omogućava točnost (svodi regulacijsko odstupanje na nulu) i derivacijski član daje stabilnost. Podešavanje PID regulatora, odnosno parametarsko optimiranje može se provesti na nekoliko načina, od ručnog koje često rezultira krivim postavka do primjene metoda kao Zieler-Nichols ili Tyreus Luyben i slične (Ogata, 2010).

PID regulatori prema svojoj izvedbi mogu biti ili pneumatski ili električni, odabir izvedbe ovisi o sredini u kojoj će se primjenjivati, odnosno ovisno o potencijalnim opasnostima. može se dati prednost pneumatskima

2.4. TERMOELEKTRIČNI EFEKT

Termoelektrični efekt jest pojam koji označava načine direktne pretvorbe toplinske energije u električnu i obratno, odnosno tri različita fenomena (pojave): Seebeckov, Peltierov i Thomsonov efekt (Rowe, 2006).

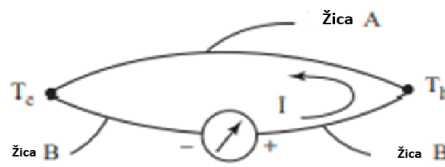
2.4.1 Seebeckov efekt

Ime je dobio po njemačkom fizičaru Thomasu Johannu Seebecku koji ga je otkrio 1821. godine, predstavlja pojavu stvaranja elektromotorne sile (EMF) u zatvorenom električnom krugu sastavljenom od dvaju različitih vodiča ili poluvodiča kada su njihovi spojevi na različitim temperaturama. Ovaj efekt je temeljni princip termoelektričnih generatora i ima značajne primjene u pretvorbi toplinske energije u električnu. Kada se spojevi dvaju različitih materijala održavaju na različitim temperaturama, dolazi do difuzije elektrona ili šupljina (u slučaju poluvodiča) od toplijeg prema hladnijem spoju. Ova difuzija stvara razliku potencijala između spojeva, što rezultira stvaranjem elektromotorne sile. Veličina ove sile ovisi o vrsti materijala i razlici temperatura između spojeva. Seebeckov efekt se može kvantitativno opisati pomoću Seebeckovog koeficijenta α [μVK^{-1}], koji predstavlja omjer između generirane elektromotorne sile U [V] i temperaturne razlike između spojeva ΔT [K]; jednadžba (8).

$$U = \alpha \cdot \Delta T \text{ [V]} \quad (8)$$

Ovaj koeficijent varira ovisno o materijalu i može biti pozitivan ili negativan, ovisno o smjeru difuzije nositelja naboja. Jedna od najvažnijih primjena Seebeckovog efekta je u termoelektričnim generatorima, koji se koriste za pretvorbu otpadne topline u električnu energiju. Ovi generatori imaju široku primjenu u industriji, automobilima i svemirskim letjelicama, gdje omogućavaju učinkovitu iskorištavanje toplinske energije.

Seebeckov efekt također ima važnu ulogu u razvoju termoelektričnih senzora - termoparova (Slika 5) i mjernih uređaja koji se koriste za precizno mjerenje temperaturnih razlika i kontrolu industrijskih procesa (Van Herwaarden i Sarro, 1986).



Slika 5 Temopar (Lee 2010)

2.4.2 Peltierov efekt

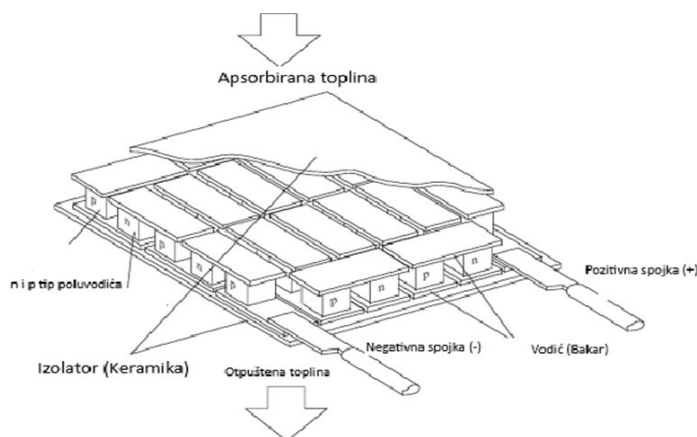
Nazvan po francuskom fizičaru Jean Charlesu Athanaseu Peltieru koji ga je otkrio 1834. godine, predstavlja fenomen apsorpcije ili emisije topline na spoju dvaju različitih vodiča kada kroz njih teče električna struja. Kada električna struja prolazi kroz spoj dvaju različitih materijala, dolazi do prijenosa topline koji ovisi o smjeru struje. Ako struja teče u jednom smjeru, toplina se apsorbira na spoju, dok se u suprotnom smjeru toplina emitira. Ova pojava je suprotna Jouleovom grijanju, gdje se toplina uvijek generira bez obzira na smjer struje. Peltierov efekt može se kvantitativno opisati pomoću Peltierovog koeficijenta, koji ovisi o vrsti materijala i temperaturi spoja. U vodičima je ovaj efekt relativno slab, dok je u poluvodičima znatno izraženiji, što ih čini pogodnima za primjenu u termoelektričnim uređajima. Jedna od najvažnijih primjena Peltierovog efekta je u termoelektričnim modulima, koji se koriste za hlađenje ili grijanje. Ovi moduli, poznati kao Peltierovi hladnjaci, koriste se u raznim uređajima, od prijenosnih hladnjaka do sofisticiranih sustava za kontrolu temperature u elektronici (Lee, 2010).

2.4.3 Thomsonov efekt

Predstavlja fenomen apsorpcije ili otpuštanja topline kada električna struja prolazi kroz vodič čiji krajevi imaju različite temperature, a ovisno o materijalu koji čini vodič i smjeru protoka struje. Količina topline koja se apsorbira ili otpušta proporcionalna je jakosti električne struje i temperaturnom gradijentu (Rowe, 2006).

Ovi fenomeni zajedno čine osnovu termo električnih uređaja i omogućuju pretvorbu toplinske energije u električnu energiju i obrnuto. Razumijevanje ovih efekata ključno je za dizajn i primjenu termo električnih uređaja u različitim industrijskim i znanstvenim područjima.

2.5. HLAĐENJE POMOĆU TERMOELEKTRIČNIH UREĐAJA



Slika 6 Presjek Peltierovog uređaja (Lee, 2010)

Toplinski i električni fenomeni su čvrsto povezani s termoelektrikom, disciplinom koja omogućuje direktnu pretvorbu toplinske energije u električnu i obrnuto. Ovaj proces se postiže pomoću termo električnih materijala, koji su temelj termoelektričnih uređaja. Termoelektrični uređaji, poput termoelektričnih generatora i hladnjaka, koriste se za pretvaranje toplinske energije u električnu ili za hlađenje prostora. Jedna od ključnih prednosti termoelektričnih uređaja je to što ne zahtijevaju održavanje i nemaju pokretnih dijelova, što ih čini pouzdanim i dugotrajnim (Lee, 2010).

Kontrola temperature i hlađenje također se često osiguravaju pomoću termoelektričnih hladnjaka u medicinskoj opremi i elektroničkom pakiranju. S toliko mnogo primjena, termoelektrika postaje sve značajnija kao ključna tehnologija u različitim područjima industrije i znanosti.

Unatoč relativno niskoj toplinskoj učinkovitosti, termoelektrični uređaji imaju niz prednosti. Zahvaljujući odsustvu pokretnih dijelova, ti uređaji imaju manju vjerojatnost kvara u radu, što ih čini pouzdanim i dugotrajnim rješenjem (Slika 6). Dodatno, sposobnost precizne regulacije temperature i vlažnosti čini ih izuzetno poželjnima u različitim primjenama, uključujući mikroelektroniku i medicinske uređaje. Ta svojstva omogućuju termoelektričnim uređajima da pruže stabilno okruženje koje je ključno za očuvanje osjetljivih komponenti i uređaja te osigurava pouzdanost i dugovječnost u njihovom radu (Lee, 2010).

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. ZADATAK

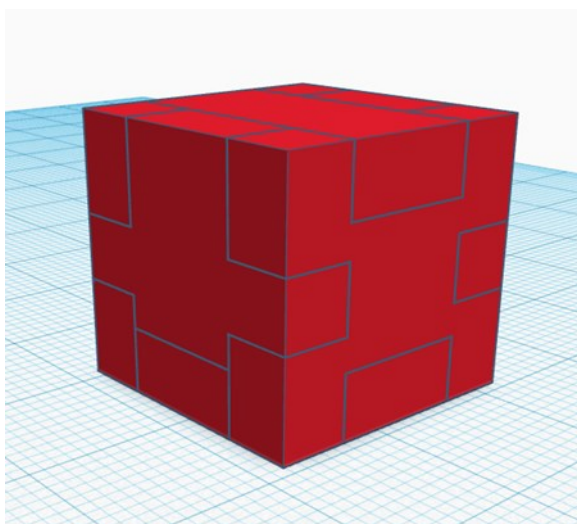
Cilj ovog rada je izraditi funkcionalni model rashladne komore s PID regulacijom temperature. Sustav će omogućiti korisniku da putem intuitivnog sučelja odabere željenu temperaturu, dok će temperatura unutar komore biti kontinuirano nadzirana i prikazivana u realnom vremenu.

3.2. MATERIJALI I METODE

Model se sastoji od komore izrađene od ekstrudiranog polistirena (XPS), TEC1-12706 Peltierovih elemenata za hlađenje, Dallas DS18B20 mjernog osjetila temperature, LCD zaslona, mikro prekidača i Arduino Uno R3 razvojne pločice koji čine upravljački dio. Za razvoj programa i programiranje mikroupravljača korišten je Arduino IDE razvojna okolina.

3.2.1 Konstrukcija komore

Rashladna komora projektirana je u aplikaciji Thincercad, vanjskih dimenzija 200 mm x 200 mm x 200 mm (**Slika 7**), a izrađena je od ekstrudiranog polistirena trgovačkog imena Pofix XPS debljine 50 mm. XPS je nabavljen u pločama dimenzija 1250 mm x 600 mm iz kojih su izrezivane stranice komore (**Slika 8**).



Slika 7 3D model rashladne komore u Tinkercadu (vlastita arhiva)

Za obradu korišten je tapetarski nož, ručna pila, tračna stolna pila i električna stolna i ručna bušilica. Stranice komore su izrezane u oblike koji s kasnije spoje pomoću urezanih utora kao slagalica, kako bi se postigla mehanička čvrstoća i pojednostavnila konstrukcija. XPS je izabran

zbog svojih dobrih mehaničkih i izolacijskih svojstava, čvrstoći na pritisak $\geq 300 \text{ kPa}$ (ekvivalentno $3 \cdot 10^3 \text{ kgm}^{-2}$), granična temperatura primjene $70 \text{ }^\circ\text{C}$, otpornost na vlagu i toplinska vodljivost $\lambda_D = 0,035 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ (POFIX, 2024).



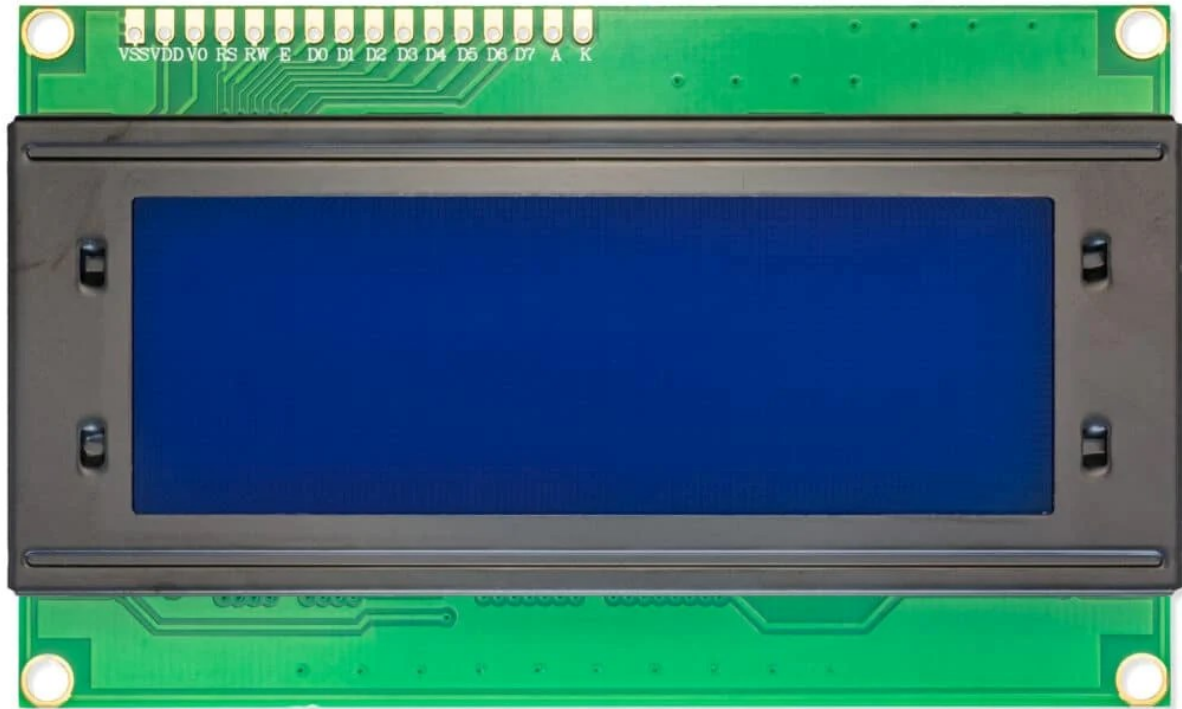
Slika 8 Ekstrudirani polistiren XPS (osobna arhiva)

Unutarnji volumen modela rashladne komore 1000 cm^3 . Kroz stijenke komore su probušene rupe za instalaciju mjernih pretvornika temperature, a u gornjoj stranici je izglođan prostor za rashladnu opremu i ožičenje. Na kraju je cijela komora obložena s ljepljivom trakom „3M Duct Tape 1900“ zbog boljeg brtvljenja spojeva i dodatne čvrstoće.

3.2.2 LCD zaslon 2004 LCD

Za prikaz informacija korišten je LCD ekran 20x4 (**Slika 9**), s bijelim slovima na plavoj podlozi, opremljen HD44780 kontrolerom. Ovaj kontroler je standard u industriji za upravljanje alfanumeričkim LCD zaslonima s točkastom matricom zbog svoje fleksibilnosti i pouzdanosti. Ovakav zaslon može prikazati 20 znakova u 4 reda, podržava prikaz ASCII znakova, japanskih kana znakova i različitih simbola, radi na naponu od 2,4 V do 5,5 V i jedan je od najčešće korištenih zaslona u elektronici i uradi sam projektima u kombinaciji s raznim mikroupravljačima (Hitachi, 1998). Zaslon ima 16 kontakata koji služe za spajanje s mikroupravljačem, može raditi u 8-bitnom ili 4-bitnom modu. Zaslon je bio opremljen s I2C modulom zasnovanim na PCF8574 integriranom krugu, koji omogućuje komunikaciju putem

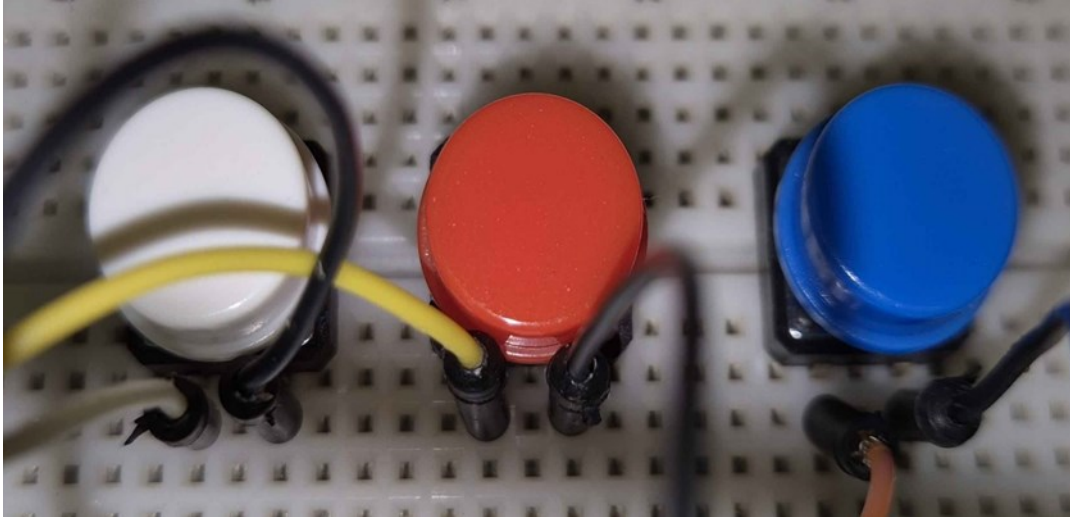
I2C protokola između zaslona i mikroupravljača, smanjujući ukupan broj konekcija na četiri (Texas Instruments, 2024).



Slika 9 Hitachi 1602 LCD (osobna arhiva)

3.2.3 Tipkala (mikroprekidači)

Tipkala (**Slika 10**) su jednostavne elektro-mehaničke komponente koje se koriste za uspostavljanje ili prekidanje električnog kruga. Kada je pritisnuto, tipkalo zatvara strujni krug omogućujući protok električne struje, dok se otpuštanjem krug prekida, zaustavljajući protok električne struje (Smith, 2011). Ovaj tip prekidača naziva se moment prekidač i razlikuje se od prekidača koji nakon pritiska i otpuštanja zadržavaju stanje uključeno odnosno isključeno. Ova tipkala se često koriste kao digitalni ulazni uređaji u različitim Arduino projektima za izradu sučelja čovjek stroj, odnosno za interakciju s korisnikom.



Slika 10 Tipkala (osobna arhiva)

3.2.4 Mjerni pretvornik temperature DS18B20

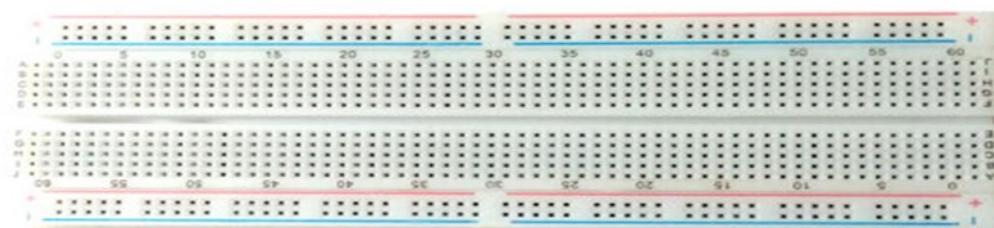
DS18B20 je mjerni pretvornik temperature (**Slika 11**) koji je izveden u formi poluvodičkog integriranog kruga, umetnutog u inox plašt. Mjerni pretvornik komunicira s mikroupravljačem pomoću 1-Wire komunikacijskog protokola. Ovaj protokol omogućuje da se na jednu 1-Wire sabirnicu spoji više mjernih pretvornika, od kojih svaki ima jedinstveni 64-bitni serijski broj preko kojeg mikroupravljač razlikuje svaki pretvornik. Posebna karakteristika ovog mjernog pretvornika, jest mogućnost napajanja preko signalnog pina, poznato kao „parazitsko napajanje“. Ono omogućuje napajati mjerni pretvornik u „parazitskom“ načinu rada te ga spojiti samo s dva kabela (signalni i uzemljenje) s mikroupravljačem, što uklanja potrebu za korištenjem dodatnog kabela za napajanje. Temperaturni mjerni raspon je od $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$, dok odstupanje mjerenja u rasponu od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ne prelazi $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Napajanje samog pretvornika u oba načina rada se zahtjeva minimalni napon od $+3\text{ V}$ do maksimalno $+5,5\text{ V}$. Razlučivost mjerenja moguće je programski postaviti u 9, 10, 11 ili 12 bita, što odgovara vrijednostima od $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0,125\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $0,0625\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Maxim Integrated, 2019.).



Slika 11 DS18B20 u zaštitnoj košuljici (osobna arhiva)

3.2.5 Ploča za prototipiranje "Breadboard"

Pločica za prototipiranje (**Slika 12**) je perforirana plastična ploča koja u podlozi ima električne kontakte koji su međusobno povezani na specifični način. Ploča omogućuje brzo povezivanje većeg broja elektroničkih komponenti bez lemljenja. Pločica se sastoji od nekoliko polja koja su podijeljena utorima, što znači da nisu električni spojena. Sa svake strane postoje dva polja s dva stupca označenih s crvenom (+) i plavom bojom (-) koji su električni povezani kroz stupac. Ostatak ploče podijeljen je na retke označene brojevima i stupce označene slovima. Električni spoj postoji unutar isto retka i polja, a stupci nisu međusobno električno povezani. Razmak rupica standardiziran je i omogućuje umetanje i integriranih krugova kao i ostalih aktivnih i pasivnih elektroničkih komponenata. Dodane električne kontakti se ostvaruju uporabom žičica. Ploče dolaze u različitim veličinama i omogućuju brzu spajanje i testiranje manje ili više složenih električnih krugova.

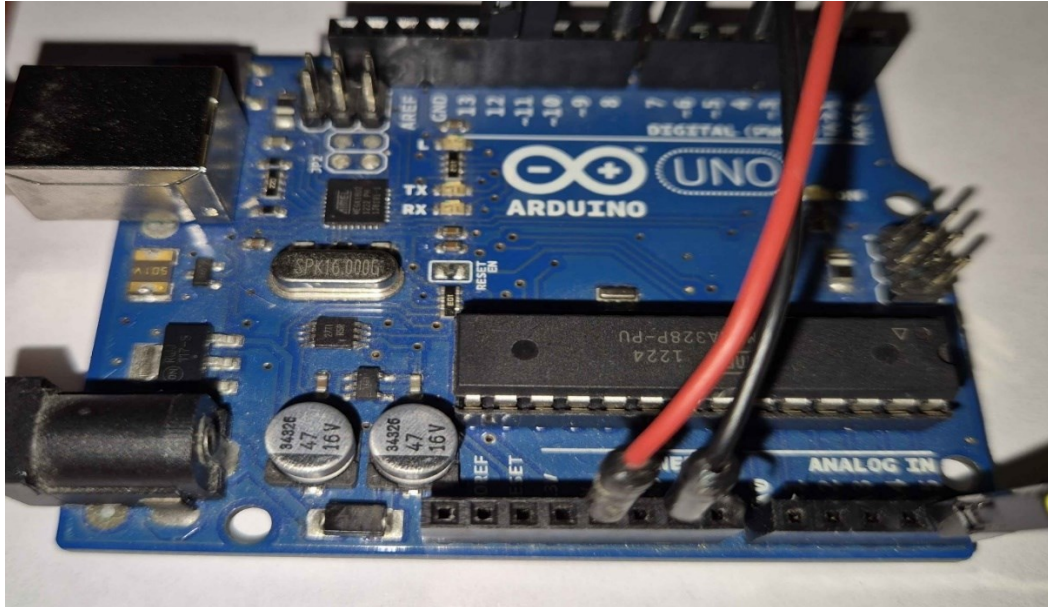


Slika 12 Ploča za prototipiranje (osobna arhiva)

3.2.6 Arduino UNO R3 i Arduino IDE razvojna okolina

Arduino Uno R3 (**Slika 13**) je jedna od najpopularnijih mikroupravljačkih ploča u Arduino obitelji, zahvaljujući svojoj jednostavnosti, fleksibilnosti i širokoj podršci zajednice. Temelji se na ATmega328P mikroupravljaču i nudi bogat skup značajki koje omogućuju raznovrsne primjene u elektronici i programiranju. Na računalo se povezuje moću USB B priključka, preko kojeg se programira i napaja s radnim naponom od 5 V, međutim može se napajati s naponom od 7 V do 12 V jer ima ugrađeni naponski regulator. UNO R3 posjeduje 14 digitalnih ulazno/izlazni (U/I) pinova (programski se određuje) od kojih se 6 može koristiti kao izlaze s pulsnom modulacijom za kontrolu uređaja kao što su istosmjerni elektromotori (broj okretaja) ili LED diode (intenzitet). Osim digitalnih ima i 6 ulaznih analognih pinova koji omogućuju mjerenje napona u rasponu od 0 V do 5 V. Digitalni U/I pinovi mogu maksimalno dati 20 mA po pinu, za veća trošila potrebno je dodatno napajanje. Mikrokoupravljač radi na frekvenciji od 16 Hz (sat – „Clock“) posjeduje 32 KB Flash memorije (0,5 KB koristi bootloader), 2 KB statičkog RAM-a (SRAM) i 1 KB EEPROM memorije. Opremljen je ICSP priključkom za direktno programiranje mikroupravljača na ploči, reset tipkom i LED diodom spojenom na digitalni pin 13 (Hughes, 2016).

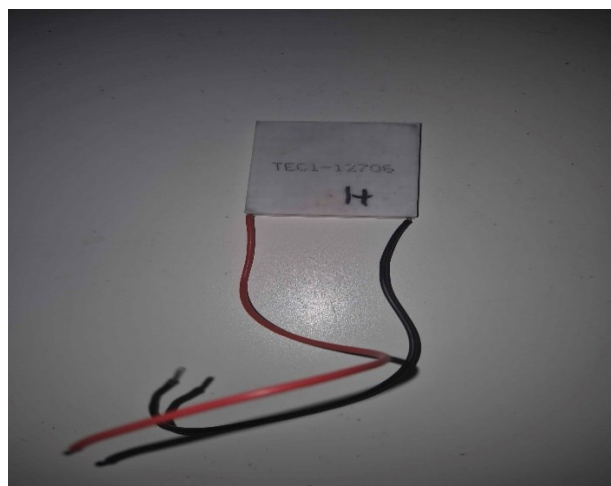
Arduino IDE je besplatna razvojna okolina za Arduino kompatibilne pločice, predstavlja ključnu alat za razvoj aplikacija i programiranje pločica (učitavanje programa na mikroupravljač), napisana je u programskom jeziku Java. Dostupna je na više operativnih sustava uključujući Windows, macOS i Linux. Razvojna okolina sastoji se od jednostavnog korisničkog sučelja koje uključuje uređivač koda, serijski monitor i alat za učitavanje koda na mikroupravljač (Soderby and Hysten, 2024). Uređivač podržava sintaksno isticanje koda, automatsko dovršavanje i osnovne funkcije za uređivanje teksta. Uređivač koda je centralni element u kojem se pišu programi, poznati kao „skice“, podržava C i C++ programske jezike. Arduino IDE dolazi s velikim brojem ugrađenih biblioteka koje pojednostavljuju rad s različitim sensorima, akuatorima i drugim komponentama. Također je moguće preuzete dodatne biblioteke.



Slika 13. Arduino UNO R3 (osobna arhiva)

3.2.7 TEC1-12706

TEC1-12706 (**Slika 14**) je Peltierov uređaj dimenzija 40 mm x 40 mm, može raditi s maksimalnim radnim naponom od 16,4 V, pri čemu maksimalna jakost električne struje koja prolazi kroz element iznosi 6,4 A. Pri tim maksimalnim vrijednostima, najveća temperaturna razlika između tople (50 °C) i hladne strane iznosi $\Delta T_{max} = 75\text{ °C}$ i $Q_{max} = 57\text{ W}$ (HB Electronic Components, 2024). Električni otpor modula iznosi $R = 2,30\ \Omega$.



Slika 14. TEC1-12706 (osobna arhiva)

4. REZULTATI I RASPRAVA

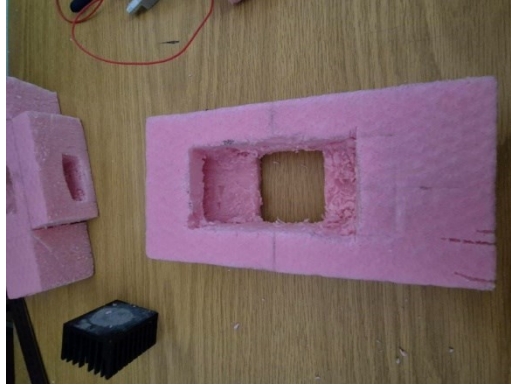
4.1. MODEL KOMORE

Komora ima unutrašnje dimenzije 10 cm x 10 cm x 10 cm, pravokutnog oblika i volumen od 1000 cm³, izrađena je od ekstrudiranog polistirena (XPS) debljine 5 cm. Izrađena su dva modela komore. Prva komora je izrađena na način da su elementi komore izrezani su ručnom pilom iz XPS-a prema modelu razvijenom u Thinkcad-u, sastavljeni i obloženi samoljepljivom folijom. Ručno rezanje je rezultiralo smanjenom preciznosti rezova i nesavršenom prijanjanju bridova s pojavom šupljina što se negativno odrazilo na izolacijska svojstva (**Slika 15**). Drugi model komore se razlikuje od prvog po tome što je XPS izrezivan stolnom tračnom pilom što je za rezultiralo precizno izrezanim elementima, odnosno boljim izolacijskim svojstvima.



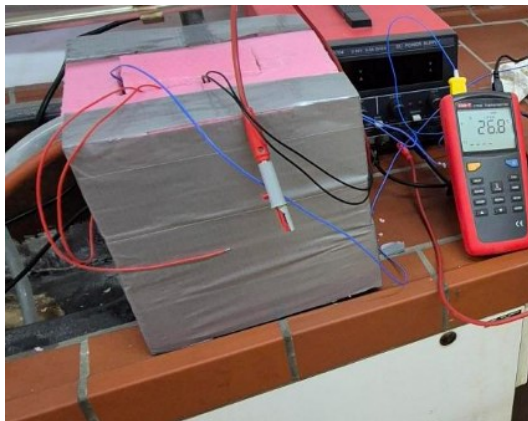
Slika 15 Prvi model komore ručno rezan (osobna arhiva)

Kroz tijelo komore probušena je rupa promjera 4 mm, ručnom bušilicom i kroz rupu je uvedeno i pozicionirano mjerno osjetilo (senzor) temperature DS18B20. Osjetilo je pozicionirano uz stranicu komore (horizontalno) i središnje po visini, kako bi što manje opstruiralo unutarnji volumen a pri tome dalo što točniju informaciju o temperaturi u komori. U gornjoj stranici komore je izdubljen prostor za smještaj vodenog hladila i Peltierovih elemenata, te je izrađen odgovarajući poklopac (**Slika 16**).



Slika 16 Gornja stranica komore (osobna arhiva)

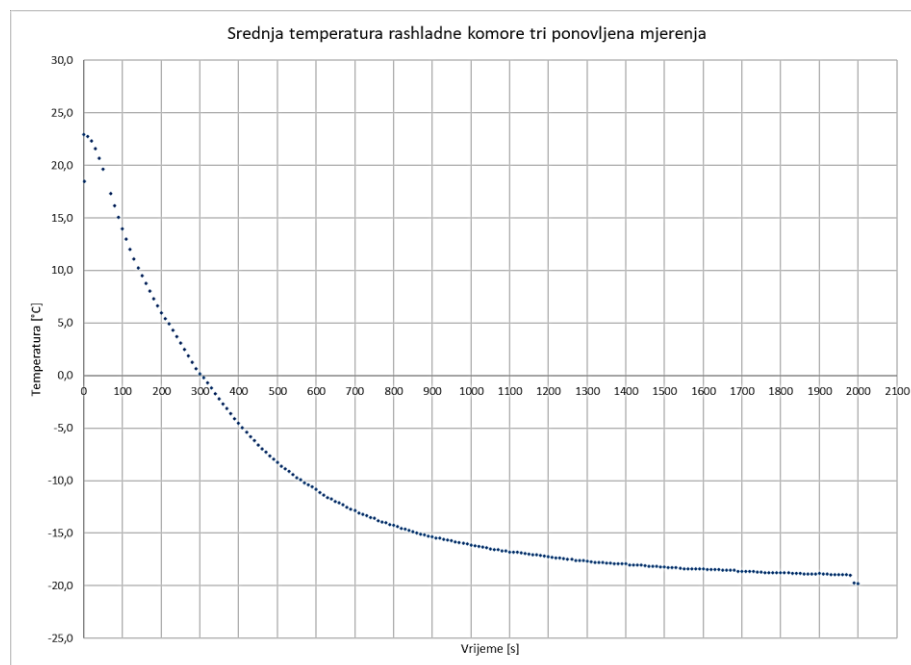
Također, na donjoj stranici vrata komore izrađen je otvor veličine 50 mm x 60 mm za montiranje pasivnog aluminijskog hladnjaka koji ulazi u samu komoru i služi za hlađenje iste. Izgled završenog modela komore pri testiranju dan je na **Slika 17**.



Slika 17 Model komore s ugrađenim elementima (osobna arhiva)

4.2. SUSTAV HLAĐENJA KOMORE

Model rashladne komore hladi se pomoću Peltierovih elementa model TEC1-12706, dimenzija 40 mm x 40 mm x 3,8 mm. Ovi elementi mogu postići maksimalnu razliku temperature tople i hladne strane od 75 °C, uz maksimalnu dozvoljenu temperaturu tople strane od 138 °C, stoga je potrebno osigurati dobro hlađenje tople strane elementa (HB Electronic Components, 2024). Sustav za hlađenje sastavljen je od vodeno hlađenog aluminijskog bloka dimenzija 80 mm x 40 mm x 12 mm, dva TEC1-12706 modula (PE1 i PE2) i pasivnog aluminijskog hladnjaka složenih u stog prema redu navođenja. Kontaktne površine između rashladnih elemenata tretirane su termo-pastom proizvođača Artic model MX-4, koja se inače koristi pri hlađenju procesora u računalima, s ciljem boljeg provođenja topline. Vodeno hlađenje, hlađeno vodovodnom vodom



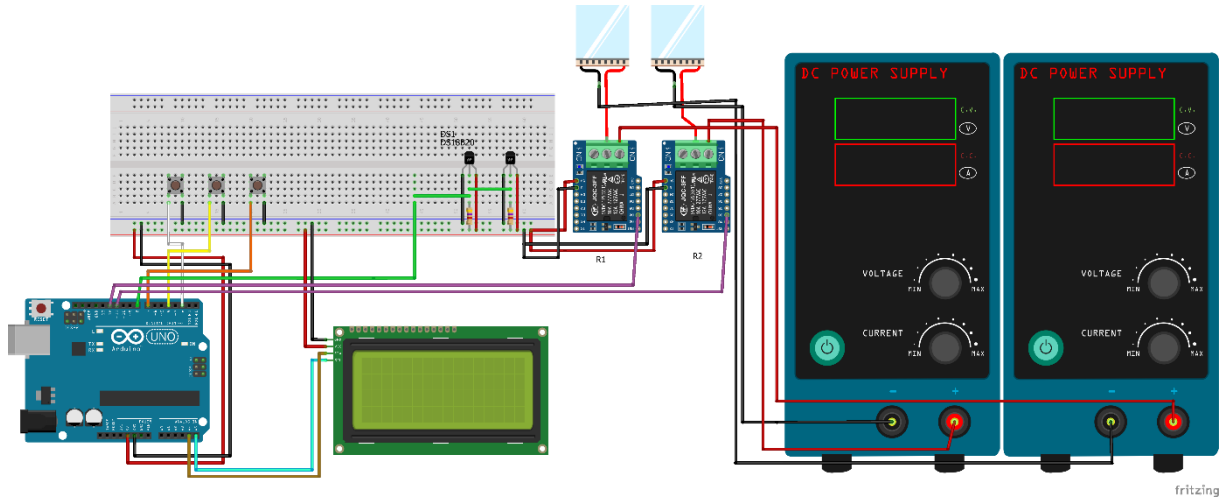
Slika 18 Dinamika hlađenja rashladne komore (osobna arhiva)

iz slavine osigurava nisku temperaturu tople strane prvog modula (PE1), koja tijekom provedenih mjerenja je varirala između 21,1 °C i 24,3 °C. Peltierovi elementi napajani su pomoću laboratorijskih napajanja 0 V – 30 V i maksimalne jakosti struje od 15 A. Svaki element se napajao iz vlastitog reguliranog laboratorijskog izvora istosmjernog napona, prvi element do vodenog hlađenja je napajan s naponom od 8 V a drugi s naponom od 4 V, pri tome trošeci od 2,7 A do 3,2 A i 1,4 A do 1,5 A električne struje. Minimalno postignuta temperatura aluminijskog hladnjaka s ovom postavom je iznosila -30 °C nakon pola sata rada. Povećanje napona na elementima nije imalo značajniji utjecaj na postignutu minimalnu temperaturu,

vjerojatno zbog Joule-ovog zagrijavanja samih elemenata. Rezultati dinamike hlađenja komore dana na **Slika 18**. Temperatura unutar komore pomoću ovog rashladnog sustava i korištene izolacije omogućuje postizanje temperatura do $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ u roku od pola sata (33 minute). Snimljena prijelazna karakteristika modela (dinamika hlađenja komore) predstavlja objekt regulacije u širem smislu ili proces (P) koja obuhvaća dinamiku postavnog člana (sustav hlađenja), objekta regulacije (rashladna komora) i mjernog člana (DS18B20), na temelju kojeg se provodi parametarsko optimiranje PID regulatora. Kako cilj ovog rada predstavlja izradu modela rashladne komore, kod kojih raspon radnih temperatura se kreće od $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, na temelju provedenih mjerenja može se zaključiti da je učin konstruiranog rashladnog uređaja više nego dostatan za postavljeni cilj. Peltierovi elementi nisu energetske učinkoviti hladnjaci, prema navodima proizvođača maksimalna snaga hlađenja je 57 W pri čemu angažirana snaga električne energije iznosi 105 W ($P = 16,4\text{ V} \cdot 6,4\text{ A} = 104,96\text{ W}$), što predstavlja $54,29\%$ iskorištenja (HB Electronic Components, 2024).

4.3. ELEKTRIČNA SHEMA SUSTAVA

Sve komponente koje čine sustav povezane su na mikrokontrolersku pločicu Arduino UNO R3, kako je prikazano na **Slika 19**.



Slika 19 Shema spajanja komponenti na mikrokontroler (osobna arhiva)

Tipkalo su spojena na digitalne pinove 2,4 i 7 s uključenim ugrađenim „pull-up“ otpornicima. Na ovakav način spriječeno je „plutanje“ digitalnog ulaza i krivo očitavanje stanja tipkala, samo treba voditi računa da pri aktiviranju „pull-up“ otpornika postiže inverzna logika (nije pritisnuto tipkalo = HIGH, pritisnuto tipkalo = LOW). Na pin 8 (OneWire sabirnica) Arduinoa spojeni su mjerni pretvornici temperature DS18B20 (signalni, srednji pin), a napajaju se s pločice (+5V desni pin) i GND (lijevi pin). LCD zaslon osim napajanja s pločice za prototipiranje, spojen je na pin A4 (SDA) i A5 (SCL) mikroupravljača. Releji (kontrolni pin) su spojeni na pinove konfigurirane kao digitalni izlazi, pinovi 12 i 13, na Arduinou. Releji su spojeni s napajanjima (+) na normalno otvorenom (NO) konektoru i s Peltierovim elementima (+) izlazom, na taj način prekidaju napajanje Peltierovih elemenata. Peltierovi elementi s (-) konektorom spojeni su direktno na pripadajuće napajanje.

4.4. PROGRAMSKO RJEŠENJE I PID REGULACIJA TEMPERATURE

Programsko rješenje za upravljanje modelom rashladne komore može se podijeliti u tri funkcionalna dijela: dio za mjerenje temperature u komori, dio korisničkog sučelja (sučelje čovjek-stroj, eng. Human Machine Interface HMI). Kako bi se olakšao razvoj programa korištene su biblioteke za rad s LCD zaslonom, temperaturnim osjetilima i PID regulatorom:

- Wire.h – I2C protokol
- LiquidCrystal_I2C.h – biblioteka za rad s LCD zaslonom,
- OneWire.h – „OneWire“ protokol za komunikaciju s ds18b20 osjetilima,
- DallasTemperature.h – biblioteka za upravljanje s ds18b20 osjetilima,
- QuickPID.h – implementacija PID regulatora.

Naveden biblioteke se definiraju na početku programa naredbom `#include <ime_biblioteke.h>`. Nakon uključivanja u program biblioteke omogućuju lagani način postavljanja uređaja i usluga te njihova korištenja preko ugrađenih metoda i funkcija.

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <QuickPID.h>
```

Nakon pozvanih biblioteka, definiraju se klase i njihove instance za definiranje postavki uređaja i funkcije koje će biti korištene u glavnom dijelu programa. Za korištenje LCD zaslona potrebno je prvo definirati klasu i definirati adresu na I2C sabirnici u heksadesimalnom obliku (0x27), te definirati broj znakova i redaka zaslona. Funkcija `void lcdinit()` služi za inicijalizaciju zaslona i ispisa početnog teksta, a poziva se iz funkcije `void setup()`.

```
// Inicijaliziraj LCD s I2C adresom 0x27, 20 stupaca i 4 reda
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);

void lcdInit() {
  // Pokreni LCD
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Komora: ");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Hladnjak: ");
  lcd.setCursor(0, 2);
  lcd.print("Set temp: ");
  lcd.setCursor(10, 2);
  lcd.print(setpoint);
  lcd.print((char)223); // Simbol stupnja
  lcd.print("C ");
}

```

Za korištenje mjernih osjetila, prvo se definira fizička adresa sabirnice, tj. broj pina na koji je spojeno osjetilo. Nakon toga se kreira klasa koja definira sabirnicu, takozvani konstruktor koji je onda proslijeđen preko reference biblioteci DallasTemperature za komunikaciju s osjetilima te stvaranje dvije varijable za pohranu adresa osjetila.

```
#define ONE_WIRE_BUS 8
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
DeviceAddress sensor1, sensor2;

```

Za inicijalizaciju ostalih ulazno izlaznih uređaja definirane su varijable za pohranu pinova na koji su elementi spojeni s Arduino razvojnom pločicom.

```
const int buttonConfirmPin = 2; // Gumb za potvrdu postavljene temperature
const int buttonIncreasePin = 4; // Gumb za povećanje postavljene temperature
const int buttonDecreasePin = 7; // Gumb za smanjenje postavljene temperature
const int relayPin1 = 12; // Relay 1 spojen na digitalni pin 12
const int relayPin2 = 11; // Relay 2 spojen na digitalni pin 11

```

Nakon definiranih svih varijabli potrebnih za rad programa, izvršava se funkcija **void setup()**, koja se izvodi samo jednom prilikom prvog pokretanja programa, kroz čije izvršavanje se inicijalizira cijeli sustav tj. mikropravljач se postavi za rad.

Glavni dio svakog Arduino programa je funkcija *void loop()*, koja predstavlja glavnu petlju koja se stalno iznova ponavlja. Glavni dio programa prvo očitava temperature s osjetila, temperaturu komore i temperaturu hladila (informativna i nije bitna za regulaciju). Temperatura komore se prosljeđuje kao ulaz PID regulatoru za izračun djelovanja. Djelovanje PID regulatora, obzirom da se radi o digitalnim postavnim članovima (uključeno/isključeno), se mapira u promjenjivo vrijeme rada rashladnih elemenata. U nastavku glavne petlje ispisuju se informacije na LCD zaslon i provjerava se stanje tipkala kako bi se mogle poduzeti akcije sukladno unosu korisnika (podešavanje željene temperature komore). U izvornom kodu također su dodani elementi koji služe za provjeru ispravnog rada programe te ispravljanje eventualnih pogrešaka. Cijeli izvorni kod dan je u **Prilogu 1**.

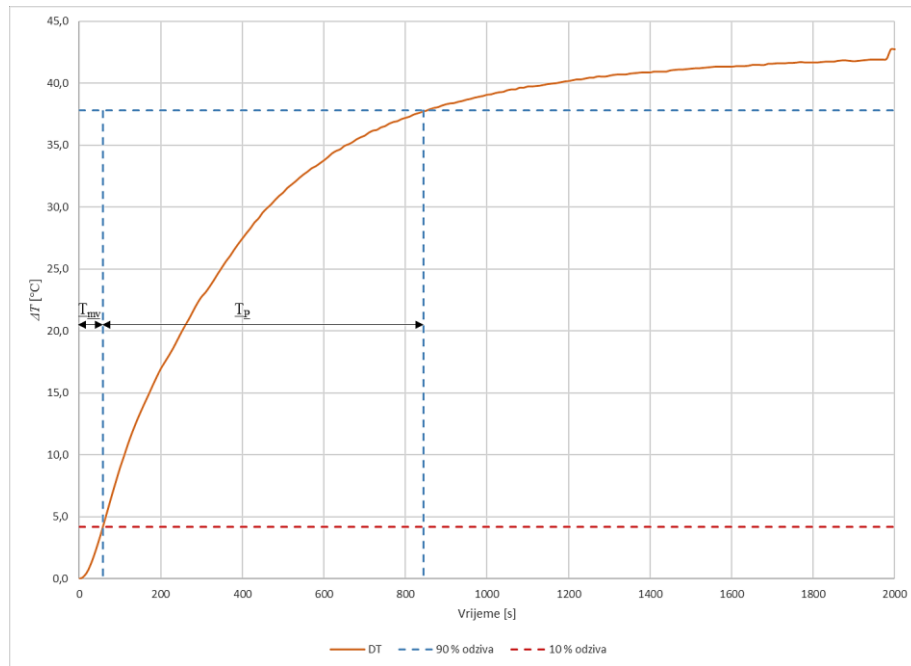
4.5. PARAMETARSKO OPTIMIRANJE PID REGULATORA

Nakon provedenih mjerenja i dobivanja prijelazne karakteristike modela, moguće je primjenom empirijskih metoda izvršiti parametarsko optimiranje PID regulatora. Neke od najpoznatijih empirijskih metoda su (Sen i sur., 2015):

- Ziegler-Nichols-ova metoda,
- Chien-Hrones-Reswick (CHR) metoda,
- Cohen-Coon metoda.

Najstarija i najčešće upotrebljavana je Ziegler-Nichols-ova metoda, koja se dijeli na metodu za sustave bez povratne sprege gdje se sustav pobudi s udarnom pobudom a odziv se koristi za određivanje parametara regulatora i na metodu s povratnom spregom. U drugom slučaju PID regulatoru povećava se pojačanje proporcionalnog dijela (K_P) dok sustav ne počne oscilirati. Na temelju kritičnog pojačanja (K_{KR}) i perioda oscilacija (P_{KR}) određuju se parametri regulatora (K_P, T_I i T_D) (Ogata, 2010). CHR metoda je slična prethodnoj, ali ima prednost u sustavima s značajnim mrtvim vremenom. Postoje dvije verzije ove metode, prva koja ima za cilj minimizirati prebačaj u odzivu sustava (čvrsta) i druga koja cilja na minimalno trajanja prijelaznog procesa bez obzira na inicijalni prebačaj (slijedna). Cohen-Coon metoda je pogodna za sustave s poznatim modelom procesa. Koristi se za podešavanje regulatora na temelju odziva sustava na udarnu pobudu. Parametri regulatora se određuju na temelju vremena kašnjenja i vremena porasta sustava.

U ovom radu korištena je Chien-Hornes-Reswick metoda, druga verzija s naglaskom na brzinu postizanja željene vrijednosti regulirane veličine, odnosno minimalnog trajanja prijelaznog procesa bez obzira na prebačaj. Za izračun parametara PID regulatora, potrebno je odrediti iz prijelazne karakteristike sustava dva parametra, vrijeme zadržavanja (tzv. mrtvo vrijeme) T_{mv} i vrijeme porasta T_P .



Slika 20 Određivanje parametara T_{mv} i T_p iz prijelazne karakteristike

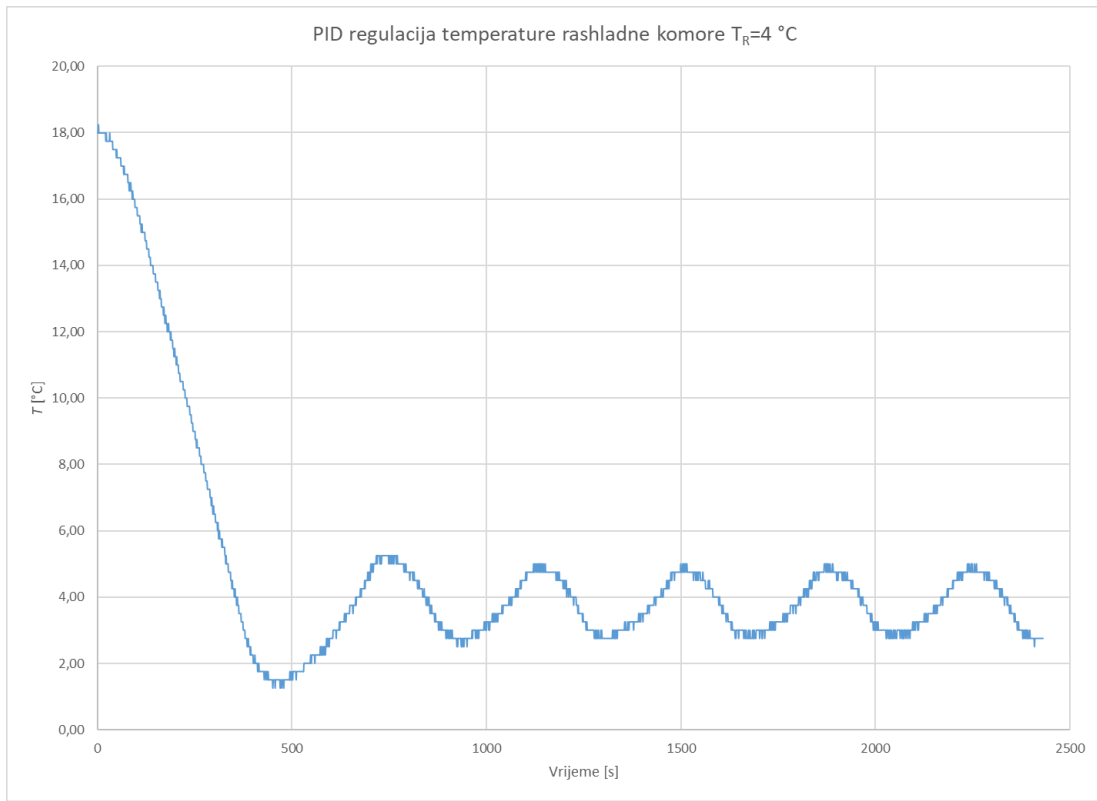
Vrijeme zadržavanja određeno je kao vrijeme kada odziv sustava dosegne 10 % konačnog odziva (4,2 °C), a iz izmjerenih podataka iznosi $T_{mv} = 56$ s. Vrijeme porasta se izračuna se iz vremena kada sustav dosegne 90 % konačnog odziva (37,8 °C) i od njega se oduzme vrijeme zadržavanja, $T_p = 850$ s – 56 s = 794 s. Ova dva parametra uvrstimo u jednadžbe (9), (10) i (11) te izračunamo $K_p = 13,6$ s, $T_I = 134,4$ s i $T_D = 23,5$ s.

$$K_p = 0.96 \cdot \frac{T_p}{T_{mv}} \quad (9)$$

$$T_I = 2,4 \cdot T_{mv} \quad (10)$$

$$T_D = 0.42 \cdot T_{mv} \quad (11)$$

Nakon parametarskog optimiranja PID regulatora, ostvarena je regulacija temperature u rashladnoj komori s odstupanjem od $\pm 1^\circ\text{C}$ (Slika 21).



Slika 21 Rezultati PID regulacije temperature

5. ZAKLJUČCI

Na temelju provedenih mjerenja, testiranja i obrade rezultata možemo zaključiti slijedeće:

- Ekstrudirani polistiren debljine 50 mm, zahvaljujući svojim mehaničkim i izolacijskim svojstvima, pogodan je za izradu modela rashladne komore. Lako se obrađuje i oblikuje, otporan je na vlagu i na ponavljane cikluse smrzavanja/odmrzavanja. Također je financijski pristupačan.
- Arduino Uno R3 razvojna pločica predstavlja dobar temelj za izradu sustava automatske regulacije zbog jednostavnosti korištenja, dostupne literature i velike zajednice korisnika. Temelji se na principima otvorenog koda, a postoji veliki broj biblioteka koje omogućuju integraciju velikog broja uređaja u sustav. Programski PID regulator lako se implementira pomoću QuickPID biblioteke (postoje i opcije).
- Peltierovi elementi, kao termoelektrični uređaji, nisu energetske učinkoviti u pretvorbi električne energije u toplinu (grijanje ili hlađenje). Međutim, njihova prednost je jednostavna konstrukcija, zauzimaju vrlo malo prostora i prenosivi su. Za optimalan rad potrebno je osigurati dobro hlađenje tople strane elementa te obratiti pozornost na kondenzaciju vlage koja ih može oštetiti.
- Razvijeni model je pogodan za edukacijske svrhe i demonstraciju principa rada termoelektričnih rashladnih sustava te primjene PID regulatora za automatsku regulaciju temperature.

6. LITERATURA

- Carta, G., 2021. Heat and mass transfer for chemical engineers: principles and applications. McGraw-Hill Education, New York.
- Državni zavod za mjeriteljstvo, 2015. Pravilnik o mjernim jedinicama, NN 88/2015.
- Ebenezer, O.K., Olajide, O.M., Aborisade, D., 2021. Optimal Design Model of Temperature Regulated for Fruits and Vegetable Preservation System Using Auto-tuned PID Controller.
- Encyclopædia Britannica, Inc, 2024. Cooling system [WWW Document]. Encyclopedia Britannica. URL <https://www.britannica.com/technology/cooling-system> (accessed 9.24.24).
- Gamba, M., Gonella, A., Palazzi, C.E., 2015. Design issues and solutions in a modern home automation system, in: 2015 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). Presented at the 2015 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), IEEE, Garden Grove, CA, USA, pp. 1111–1115. <https://doi.org/10.1109/ICCNC.2015.7069505>
- HB Electronic Components, 2024. Thermoelectric cooler TEC1-12706.
- Hitachi, 1998. HD44780U (LCD-II) (Dot Matrix Liquid Crystal Display Controller/Driver).
- Hughes, J.M., 2016. Arduino: a technical reference: a handbook for technicians, engineers, and makers, First edition. ed. O'Reilly, Beijing Boston Farnham Sebastopol Tokyo.
- Jovane, F., Koren, Y., Boër, C.R., 2003. Present and Future of Flexible Automation: Towards New Paradigms. CIRP Annals 52, 543–560. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60203-0](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60203-0)
- Kreith, F., Manglik, R.M., Bohn, M., 2011. Principles of heat transfer, 7th edition. ed. Cengage Learning, Stamford, CT.
- Lee, H., 2010. Thermal Design: Heat Sinks, Thermoelectrics, Heat Pipes, Compact Heat Exchangers, and Solar Cells, 1st ed. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470949979>
- Mathew, D., Brintha, N.C., Jappes, J.T.W., 2023. Artificial Intelligence Powered Automation for Industry 4.0, in: Nayyar, A., Naved, M., Rameshwar, R. (Eds.), New Horizons for Industry 4.0 in Modern Business, Contributions to Environmental Sciences & Innovative Business Technology. Springer International Publishing, Cham, pp. 1–28. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20443-2_1
- Maxim Integrated, 2019. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer.
- McMillan, G.K., 2012. Industrial Applications of PID Control, in: Vilanova, R., Visioli, A. (Eds.), PID Control in the Third Millennium, Advances in Industrial Control. Springer London, London, pp. 415–461. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2425-2_14
- Murugesan, R., 2006. Evolution of industrial automation. IJCAT 25, 169. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2006.009389>
- Ogata, K., 2010. Modern control engineering, 5th ed. ed. Prentice-Hall, Boston.
- Perić, J., 2012. Automatska regulacija Uvod u analizu i sintezu. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
- POFIX, 2024. Tehničke vrijednosti Pofix XPS [WWW Document]. POFIX. URL <https://pofix.com/hr/pofix-xps/#:~:text=POFIX%20XPS.%20Visokokvalitetne%20plo%C4%8De%20od%20ekst%20rudirane> (accessed 9.28.24).

- Qiu, L., Feng, Y., 2024. Thermal engineering: engineering thermodynamics and heat transfer, De Gruyter Textbook. De Gruyter, Berlin Boston.
- Rowe, D.M., 2006. Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano. CRC, Boca Raton.
- Sen, Rajat, Pati, C., Dutta, S., Sen, Ranjan, 2015. Comparison Between Three Tuning Methods of PID Control for High Precision Positioning Stage. MAPAN 30, 65–70. <https://doi.org/10.1007/s12647-014-0123-z>
- Smith, A.G., 2011. Introduction to Arduino: a piece of cake. CreateSpace Independent Publishing Platform, S. 1.
- Soderby, K., Hylen, J., 2024. Getting Started with Arduino IDE 2 [WWW Document]. Arduino Docs. URL <https://docs.arduino.cc/software/ide-v2/tutorials/getting-started-ide-v2/> (accessed 9.27.24).
- Texas Instruments, 2024. PCF8574 Remote 8-Bit I/O Expander for I2C Bus.
- Tyagi, A.K., Fernandez, T.F., Mishra, S., Kumari, S., 2021. Intelligent Automation Systems at the Core of Industry 4.0, in: Abraham, A., Piuri, V., Gandhi, N., Siarry, P., Kaklauskas, A., Madureira, A. (Eds.), Intelligent Systems Design and Applications, Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer International Publishing, Cham, pp. 1–18. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71187-0_1
- Van Herwaarden, A.W., Sarro, P.M., 1986. Thermal sensors based on the seebeck effect. Sensors and Actuators 10, 321–346. [https://doi.org/10.1016/0250-6874\(86\)80053-1](https://doi.org/10.1016/0250-6874(86)80053-1)
- Wagner, T., 2003. An Agent-Oriented Approach to Industrial Automation Systems, in: Carbonell, J.G., Siekmann, J., Kowalczyk, R., Müller, J.P., Tianfield, H., Unland, R. (Eds.), Agent Technologies, Infrastructures, Tools, and Applications for E-Services, Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 314–328. https://doi.org/10.1007/3-540-36559-1_23

7. PRILOZI

Prilog 1. Kod programskog rješenja PID regulacije rashladne komore

```

#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <QuickPID.h>

// Inicijaliziraj LCD s I2C adresom 0x27, 20 stupaca i 4 reda
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);

// Podatkovna žica je spojena na pin 8 na Arduinu
#define ONE_WIRE_BUS 8

// Postavi oneWire instancu za komunikaciju s bilo kojim OneWire uređajem
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);

// Proslijedi oneWire referencu DallasTemperature knjižnici
DallasTemperature sensors(&oneWire);

// Varijable za pohranu adresa senzora
DeviceAddress sensor1, sensor2;

// Definiraj pinove
const int buttonConfirmPin = 2; // Gumb za potvrdu postavljene temperature
const int buttonIncreasePin = 4; // Gumb za povećanje postavljene temperature
const int buttonDecreasePin = 7; // Gumb za smanjenje postavljene temperature
const int relayPin1 = 12; // Relay 1 spojen na digitalni pin 12
const int relayPin2 = 11; // Relay 2 spojen na digitalni pin 11

// myPID konstante and variable
const unsigned long windowSize = 1000;
const byte debounce = 50;
float input, output, setpoint = 4, Kp = 14.487, Ki = 134.4, Kd = 23.52;
unsigned long windowStartTime, nextSwitchTime, previousMillis = 0;
boolean relayStatus = false;

// Debug mode flag
bool debugMode = true;
bool headerPrinted = false;
bool setpointDisplayed = false;

QuickPID myPID(&input, &output, &setpoint, Kp, Ki, Kd,
               QuickPID::pMode::pOnError,
               QuickPID::dMode::dOnMeas,
               QuickPID::iAwMode::iAwClamp,
               QuickPID::Action::reverse);

void lcdInit() {

```

```

// Pokreni LCD
lcd.init();
lcd.backlight();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Komora: ");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Hladnjak: ");
lcd.setCursor(0, 2);
lcd.print("Set temp: ");
lcd.setCursor(10, 2);
lcd.print(setpoint);
lcd.print((char)223); // Simbol stupnja
lcd.print("C ");
}

void setup() {
  lcdInit();
  // Pokreni DS18B20 senzor
  sensors.begin();

  // Inicijaliziraj pinove za gumbе kao ulazne s internim pull-up otpornicima
  pinMode(buttonConfirmPin, INPUT_PULLUP);
  pinMode(buttonIncreasePin, INPUT_PULLUP);
  pinMode(buttonDecreasePin, INPUT_PULLUP);

  // Inicijaliziraj relay pin kao izlaz
  pinMode(relayPin1, OUTPUT);
  pinMode(relayPin2, OUTPUT);

  // Definiraj rezoluciju DS18B20
  sensors.setResolution(10);

  // Pronađi uređaje na sabirnici
  Serial.begin(9600);
  if (!sensors.getAddress(sensor1, 0)) Serial.println("Nije moguće pronaći adresu za Zrak");
  if (!sensors.getAddress(sensor2, 1)) Serial.println("Nije moguće pronaći adresu za Hladnjak");

  // Inicijalizacija PID
  myPID.SetOutputLimits(0, windowSize);
  myPID.SetSampleTimeUs(windowSize * 1000);
  myPID.SetMode(QuickPID::Control::automatic);
}

void loop() {

  // Zatraži temperature od DS18B20 senzora
  sensors.requestTemperatures();

```

```

// Dohvati temperature
float tempC1 = sensors.getTempC(sensor1); //Temperatura Komore
float tempC2 = sensors.getTempC(sensor2); // Temperatura Hladnjaka

// Ažuriraj unos temperature
input = tempC1;

// Računanje PID izlaza Yr
if (myPID.Compute()) {
  windowStartTime = millis();
}

// Iskoristi PID izlaz za kontrolu releja
unsigned long msNow = millis();
if (!relayStatus && output > (msNow - windowStartTime)) {
  if (msNow > nextSwitchTime) {
    nextSwitchTime = msNow + debounce;
    relayStatus = true;
    digitalWrite(relayPin1, HIGH);
    digitalWrite(relayPin2, HIGH);
  }
} else if (relayStatus && output < (msNow - windowStartTime)) {
  if (msNow > nextSwitchTime) {
    nextSwitchTime = msNow + debounce;
    relayStatus = false;
    digitalWrite(relayPin1, LOW);
    digitalWrite(relayPin2, LOW);
  }
}

// Prikaži temperature na LCD-u
lcd.setCursor(8, 0);
lcd.print(tempC1);
lcd.print((char)223); // Simbol stupnja
lcd.print("C ");

lcd.setCursor(10, 1);
lcd.print(tempC2);
lcd.print((char)223); // Simbol stupnja
lcd.print("C ");

// Provjeri gume za podešavanje postavljene temperature
if (digitalRead(buttonIncreasePin) == LOW) {
  setpoint +=0.5;
  delay(100); // Kašnjenje zbog odbijanja
}

if (digitalRead(buttonDecreasePin) == LOW) {

```

```

    setpoint -=0.5;
    delay(100); // Kašnjenje zbog odbijanja
}

// Opcionalno: funkcionalnost potvrde gumba
if (digitalRead(buttonConfirmPin) == LOW) {
    // Dodatne radnje na potvrdu mogu se dodati ovdje
    delay(100); // Kašnjenje zbog odbijanja
}

// Print readings to the Serial Monitor if debug mode is enabled
unsigned long currentMillis = millis();
if (debugMode && currentMillis - previousMillis >= 1000) { // Provjeri je li
    prošla 1 sekunda
        previousMillis = currentMillis;
        if (!headerPrinted) {
            Serial.println("Time (s), Komora (C), Set temp (4.C)");
            headerPrinted = true;
        }
        Serial.print(currentMillis / 1000); // Vrijeme u sekundama
        Serial.print(", ");
        Serial.print(tempC1);
        Serial.print((char)223); // Simbol stupnja
        Serial.print("C, ");
    }

    // Kašnjenje prije ponovnog ažuriranja temperature
    delay(100);
}

```