

# Numeričko rješenje matematičkog modela nestacionarnog prijenosa topline u višeslojnom zidu s izvorima i ponorima topline

---

**Kapusta, Antonio**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

*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:149:138725>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-08**



**FKITMCMXIX**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
SVEUČILIČNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Antonio Kapusta

NUMERIČKO RJEŠENJE MODELA NESTACIONARNOG  
PRIJENOSA TOPLINE U VIŠESLOJNOM ZIDU S IZVORIMA I  
PONORIMA TOPLINE

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:

Prof. dr. sc. Juraj Šipušić

Članovi ispitnog povjerenstva: Prof. dr. sc. Juraj Šipušić

Izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić

Izv. prof. dr. sc. Krunoslav Žižek

Zagreb, srpanj 2019.

## SAŽETAK RADA

U ovome radu sastavljena je aparatura za ispitivanje prijelaznih toplinskih pojava. Prijelazne pojave u metalnim valjcima (legura AlCuMgSi1, promjera 60.0 mm i visine 5.0 do 50.0 mm) u jednostavnoj geometriji (jedno mjesto akumulacije) pokazuju eksponencijalnu promjenu temperature tijekom vremena, dok slog više valjaka pokazuje složeniju ovisnost koju je moguće opisati sustavom običnih diferencijalnih jednadžbi. Metalni valjci zbog velike toplinske vodljivosti i difuzivnosti su gotovo izotermni i pokazuju vrlo malo kašnjenje u odzivu na skokomičnu promjenu temperature baze valjka.

Specifični toplinski kapacitet Peltierovog elementa i cijelog sustava određen je iz izmjerenog odziva temperature materijala na puls grijanja. Procjena ostalih toplinskih svojstva (koeficijenta toplinske vodljivosti, toplinske difuzivnosti i toplinske efuzivnosti) nepoznatih materijala zahtijeva daljnje unaprjeđenje aparature, mjerenja i obrade podataka (model fizičkog sustava).

Specifični toplinski kapacitet Peltierovog elementa (model TEC1 – 12706) iznosi  $801 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ . Pokušaj implementiranja Peltierovog elementa u „pasivnoj“ izolaciji kalorimetra radi smanjenja temperaturnih oscilacija ispitivanog sustava pokazao se neuspješnim.

**Ključne riječi:** *Peltierov element, nestacionarna kondukcija topline, toplinski kapacitet*

## **ABSTRACT**

In this thesis the apparatus for testing the heat transient was made. The heat transient in metal cylinders (AlCuMgSi1 alloy, diameter 60.0 mm and height 5.0. to 50.0 mm) in simple geometry (one accumulation spot) shows exponential temperature gradient over time, while the compound of more cylinders shows more complicated dependence which we are able to depict with a differential equation system. Metal cylinders, due to their high thermal conductivity and diffusivity, are almost completely isothermal and show very small delay response to temperature change on the cylinder base during a step test.

Specific heat capacity of a Peltier element and the whole system is determined from measured temperature response of material on the heating pulse. Approximation of other heat attributes (coefficient of thermal conductivity, thermal diffusivity and thermal effusivity) of unknown materials demands further development of apparatus, measurements and data processing (physical system model).

Specific heat capacity of a Peltier element (model TEC1 – 12706) is  $801 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ . The attempt to implement Peltier element in a „passive“ calorimeter insulation for the decrease of temperature oscillations in the tested system has proved to be unsuccessful.

**Keywords:** *Peltier element, transient heat conduction, heat capacity*

# Sadržaj

<b>1.) UVOD</b> .....	1
<b>2.) OPĆI DIO</b> .....	2
<b>2.1.) Toplina, temperatura i termometrija</b> .....	2
<b>2.2.) Termodinamički sustav</b> .....	3
<b>2.3.) Bilanca energije termodinamičkog sustava</b> .....	4
<b>2.4.) Prijenos topline</b> .....	5
2.4.1.) <i>Kondukcija</i> .....	5
2.4.2.) <i>Konvekcija</i> .....	7
2.4.3.) <i>Radijacija</i> .....	8
<b>2.5.) Termoelektričnost</b> .....	9
2.5.1) <i>Seebeckov efekt</i> .....	9
2.5.2) <i>Peltierov efekt</i> .....	10
2.5.3.) <i>Thomsonov efekt</i> .....	11
<b>2.6.) Jouleova toplina</b> .....	12
<b>2.7.) Prilagođenje za maksimalnu snagu</b> .....	12
<b>2.8.) Peltierov element</b> .....	13
<b>3.) EKSPERIMENTALNI DIO</b> .....	14
<b>4.) REZULTATI</b> .....	20
<b>5.) RASPRAVA</b> .....	43
<b>6.) ZAKLJUČAK</b> .....	46
<b>7.) POPIS SIMBOLA</b> .....	47
<b>8.) LITERATURA</b> .....	48
<b>9.) ŽIVOTOPIS</b> .....	49
<b>10.) PRILOG</b> .....	50

## 1.) UVOD

Toplinska svojstva materijala nužna su za mnogobrojne inženjerske primjene, a njihovo poznavanje omogućava točnije matematičke opise fenomena prijenosa topline za željene sustave. Svrha ovog rada je postići što jednostavniju, praktičniju i bolju aparaturu za provođenje toplinskih mjerenja zadanih sustava radi određivanja toplinskih svojstva materijala i modeliranja procesa prijenosa topline, što bi bio konačni cilj radova i ispitivanja koja će slijediti ovome. U radu je prikazana nužnost dobrog odabira osjetila temperature, utjecaj korištenja termovodljive paste na smanjenje kontaktnog otpora prijenosu topline i općenita izvedba aparature za mjerenje.

Kvaliteta kalorimetrijskih ispitivanja znatno ovisi o utjecaju okoline na sustav. Idealnim termostatiranjem prostora za uzorak (sustav), temperatura bi trebala biti stalne vrijednosti. Zbog utjecaja okoline, temperatura sustava zapravo oscilira oko srednje vrijednosti. Ispituje se mogućnost korištenja Peltierovog elementa za smanjenje temperaturnih oscilacija u sustavu kalorimetra vlastite izvedbe, koje su izazvane utjecajem okoline.

Osnovni cilj ovog rada, što je zapravo prvi korak u budućem procesu ispitivanja svojstva nepoznatog materijala, je procjena specifičnog toplinskog kapaciteta složenog višeslojnog sustava te korištenje takvog sustava za procjenu specifičnog toplinskog kapaciteta komponente čija su svojstva nepoznata – Peltierovog elementa.

## 2.) OPĆI DIO

### 2.1.) Toplina, temperatura i termometrija

Toplina,  $Q$ , je fizikalna veličina kojom se opisuje energija koja prelazi s jednog tijela na drugo zbog temperaturne razlike između njih i njezina mjerna jedinica je džul (J). Toplina koju nekom tijelu dovodimo ili odvodimo, tj. količina energije koja se akumulira u tijelu jest:

$$Q = mc_p \Delta T \quad (1)$$

gdje je  $m$  [kg] masa tijela,  $c_p$  [J/kgK] specifični toplinski kapacitet tijela, a  $\Delta T$  [K] temperaturna razlika između početne i konačne temperature tijela [1].

U kontekstu prijenosa topline, poželjno je govoriti o gustoći toplinskog toka ili toplinskom fluksu,  $q$ , koji je definiran kao količina energije koja je u jediničnom vremenu prenesena kroz jediničnu površinu [W/m<sup>2</sup>], a jednadžba glasi:

$$q = \frac{Q}{tA} \quad (2)$$

gdje je  $Q$  toplina,  $t$  je vrijeme trajanja procesa [s], a  $A$  je površina izmijenjene topline [m<sup>2</sup>].

Temperatura,  $t$  [°C], je jedna od osnovnih fizikalnih veličina u Međunarodnom sustavu jedinica koja opisuje toplinsko stanje i sposobnost tijela ili tvari da izmjenjuje toplinu s okolinom [2]. Prema molekularno-kinetičkoj teoriji plinova, temperatura je definirana kao mjera srednje kinetičke energije gibanja molekula.

Termodinamička temperatura,  $T$ , definira se osnovnim zakonima termodinamike i mjerna jedinica joj je kelvin [K] [2].

Mjerenje temperature je proces prijenosa topline s medija čiju temperaturu mjerimo na osjetilo, a zasniva se na nultom zakonu termodinamike koji glasi: "Ako su dva sustava u ravnoteži s trećim, onda su i međusobno u ravnoteži [3]." To znači, ako dva tijela različitih temperatura dovedemo u međusobni kontakt, čestice s većom kinetičkom energijom (toplije tijelo) u sudarima predaju energiju onima s manjom kinetičkom energijom (hladnije tijelo) te se na taj način toplina predaje s jednog tijela na drugo. Prijelaz topline teče sve dok se ne uspostavi termička ravnoteža u kojoj je srednja kinetička energija istovrsnog gibanja molekula obaju tijela jednaka. Budući da je temperatura proporcionalna srednjoj kinetičkoj energiji molekula, tijela koja se nalaze u termičkoj ravnoteži imaju istu temperaturu [1].

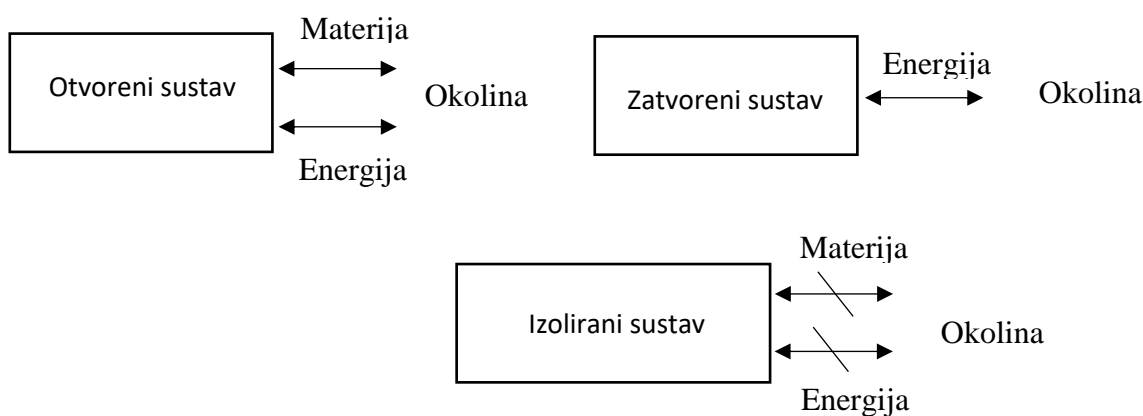
Osjetila temperature dijele se s obzirom na promjenu fizičkog stanja koje uzrokuje

promjena toplinskog stanja: dilatacijska, otpornička, radijacijska, termoelektrična, ostala. U ovom se eksperimentu temperatura određuje pomoću termoelektričnog osjetila temperature, tzv. termopara, čije je mjerno načelo Seebeck-ov efekt, detaljnije obrađen u poglavlju 5.

Koriste se K tipovi termopara (Chromel – Alumel) kao senzori temperature. Termoparovi su izvedeni u obliku izloženog spoja što znači da su neizolirane žice u direktnom kontaktu s legurom aluminija čiju temperaturu mjere. Ovakva je izvedba moguća, zato što medij u kojem se nalaze nije korozivan ni agresivan. Na taj se način dobije najbrži mogući odziv temperaturnih promjena. Pretpostavljeno je da vrijedi jedan od zakona termoelektričnih kruga, a to je to zakon homogenih materijala: na termoelektromotornu silu, što je daje termopar sa spojištima na temperaturama  $T_1$  i  $T_2$ , ne može utjecati toplina primijenjena bilo gdje u krugu ako je materijal od kojih su izrađene žice termopara homogene [4].

## 2.2.) Termodinamički sustav

Termodinamički gledano, svaki se proces može podijeliti na dva dijela, a to su sustav i okolina koji su odvojeni određenom, realnom ili imaginarnom, granicom. Sustav je dio svemira koji je odabran za istraživanje, a to konkretno može biti određeni dio volumena nekog prostora, pojedinačna kemijska reakcija, tvar, živo biće ili pojedinačna biološka stanica [5]. Okolina je sve što se nalazi izvan sustava. S obzirom da je između sustava i okoline moguća izmjena rada, topline i tvari, postoje tri osnovne vrste termodinamičkih sustava, a njihova se podjela temelji na interakciji okoline sa sustavom. Sustavi mogu biti otvoreni, zatvoreni ili izolirani (Slika 1.).



**Slika 1.** Shematski prikaz vrsta termodinamičkih sustava



Otvoreni sustav karakterizira mogućnost izmjene tvari i energije kroz granicu za vrijeme odvijanja procesa.

Zatvoreni sustav dopušta izmjenu energije s okolinom, ali ne i izmjenu tvari. To znači da ovakav sustav može izmjenjivati toplinu i rad sa svojom okolinom dok njegova masa i kemijski sastav ostaju nepromijenjeni.

Izolirani sustav je vrsta zatvorenog sustava koji onemogućuje izmjenu tvari i energije kroz granicu s okolinom.

Moguće je dalje klasificirati termodinamičke sustave na adijabatske kod kojih nema izmjene topline, ali je moguća izmjena rada i na dijatermne koji su suprotni od adijabatskih što znači da je moguća izmjena topline, ali ne i rada.

### 2.3.) Bilanca energije termodinamičkog sustava

Bilanca energije termodinamičkog sustava temelji se na zakonu očuvanja energije prema kojemu je u zatvorenom fizikalnom sustavu zbroj svih oblika energije konstantan. U zatvorenom sustavu jedan oblik energije može prelaziti u druge oblike, a da se pri tom energija ne stvara niti poništava. Promjena ukupne energije izoliranog sustava jednaka je nuli [6]. Ukupna promjena energije u sustavu za vrijeme procesa jednaka je razlici energiji koja ulazi i energiji koja izlazi iz sustava za vrijeme tog procesa, odnosno [7]:

*(Ukupna promjena energije sustava) = (ulazna energija sustava) – (izlazna energija sustava),*

$$\Delta E_{ukupno} = \Delta E_{ulaz} - \Delta E_{izlaz} \quad (3)$$

Ukoliko postoji dodatna količina energije koja je rezultat promjene jedne vrste energije u drugu, tj. količina energije koja je generirana u sustavu, utoliko se u jednadžbu dodaje generacijski član pa ona glasi:

$$\Delta E_{ukupno} = \Delta E_{ulaz} - \Delta E_{izlaz} \pm \Delta E_{generacija} \quad (4)$$

Ova jednadžba primjenjiva je za bilo koji sustav povrgnut bilo kojem procesu. Ukupna energija,  $\Delta E_{uk}$ , zapravo predstavlja akumulaciju energije. Ako je suma ulazne i generirane energije veća od izlazne, doći će do akumulacije energije u sustavu. Ako je izlazna energija veća od sume ulazne i generirane, doći će do smanjenja ukupne energije sustava. Ako je suma

ulazne i generirane energije jednaka izlaznoj, neće doći do akumulacije energije u sustavu što znači da će energija sustava ostati nepromijenjena [8]

## 2.4.) Prijenos topline

Termodinamičkim proučavanjima sustava kod kojeg dolazi do prijenosa topline možemo dobiti uvid u *promjenu između dva stanja*, zato što termodinamika govori samo o početnim i konačnim stanjima sustava, primjerice o količini toplinske energije tijekom prijelaza iz jednog ravnotežnog stanja u drugo. Ako želimo proučiti kompletan put prijenosa topline što obuhvaća mehanizam i brzinu prijenosa topline u pojedinim trenucima odvijanja procesa, nužna su znanja o prijenosu topline koja nam omogućuju kvantitativno izražavanje intenziteta prijenosa topline do postizanja stacionarnog ili ravnotežnog stanja [8].

Fenomen prijenosa topline pojavljuje se između dva tijela (i/ili fluida) u dodiru koja se nalaze na različitim temperaturama. Toplina uvijek spontano prelazi s toplijeg na hladnije tijelo, što se tumači gibanjem i sudarima molekula pri čemu dolazi do izmjene energije. U vremenskom intervalu, brojnim sudarima, molekule toplijeg tijela (veće srednje kinetičke energije molekula) predaju energiju područjima s nižom srednjom kinetičkom energijom molekula. Proces prijenosa topline odvija se sve do postizanja temperaturne ravnoteže pri čemu dolazi do promjene u vrijednosti unutarnje energije oba tijela. Termička ravnoteža je postignuta kada oba tijela posjeduju jednaku temperaturu, tj. istu srednju kinetičku energiju molekula. Razlikujemo tri mehanizma prijenosa topline: molekularni mehanizam (kondukcija), vrtložni mehanizam (konvekcija) i radijacija [9].

### 2.4.1.) Kondukcija

Kondukcija ili toplinsko provođenje je molekularni mehanizam prijenosa topline pri kojemu su čestice tvari u direktnom kontaktu. Karakterističan je za čvrsta tijela, a ovisan o fizikalnim svojstvima tvari, geometrijskim karakteristikama te o lokalnim razlikama u temperaturi. Osim u krutinama, prisutna je i kod kapljevina i plinova u mirovanju. Toplina se prenosi kondukcijom kada postoji temperaturni gradijent u čvrstom materijalu ili tekućini u mirovanju. Energija se prenosi s molekula višeg energetskog stanja na molekule nižeg

energetskog stanja nakon kontakta, a tok topline ide u smjeru opadajuće temperature jer više temperature odgovaraju višim energetskim nivoima, a toplina uvijek spontano prelazi s područja više na područje niže temperature. Na mikro razini, do kondukcije dolazi zbog kretanja ili vibracija atoma i molekula i međusobnim kontaktom s okolnim atomima ili molekulama pri čemu dolazi do prijenosa dijela energije u obliku topline na okoline atome ili molekule [9]. Dakle, može se govoriti o difuziji energije. Unutar krutina, toplina se može prenositi slobodnim elektronima (karakteristično kod vodiča) ili fononima (karakteristično kod poluvodiča i izolatora). Fonon je kvant energije mehaničkih vibracija u čvrstom tijelu te je analogan fotonu [10].

Kondukcija može biti stacionaran ili nestacionaran proces. Ukoliko se temperatura u određenoj točki ne mijenja s vremenom,  $\frac{dT}{dt} = 0$ , utoliko je temperaturni gradijent konstantan, što znači da nije funkcija vremena  $\frac{dT}{dx} \neq f(t)$ , i tada se govori o stacionarnoj kondukciji. Ukoliko se temperatura u određenoj točki mijenja s vremenom,  $\frac{dT}{dt} \neq 0$ , utoliko je temperaturni gradijent funkcija vremena,  $\frac{dT}{dx} = f(t)$ , i tada se govori o nestacionarnoj kondukciji.

Stacionarna kondukcija temelji se na prvom Fourierovom zakonu koji kaže da dolazi do prijenosa topline iz područja više u područje niže temperature kada u tijelu postoji temperaturni gradijent, a gustoća toplinskog toka proporcionalna je temperaturnom gradijentu:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (5)$$

gdje je  $q$  gustoća toplinskog toka [ $\text{W/m}^2$ ],  $\lambda$  je koeficijent toplinske vodljivosti [ $\text{W/mK}$ ] i on predstavlja konstantu proporcionalnosti,  $\frac{\partial T}{\partial x}$  je temperaturni gradijent, a negativan predznak je potreban zbog drugog zakona termodinamike: prijenos toplinske energije koji je rezultat temperaturnog gradijenta mora biti od toplijeg prema hladnijem dijelu tijela [11].

Koeficijent toplinske vodljivosti ovisi o temperaturi, tlaku i prirodi tvari i određuje se eksperimentalno. Toplinska vodljivost numerički je jednaka količini topline koja prolazi kroz jediničnu izotermnu površinu u jedinici vremena pri jediničnom temperaturnom gradijentu i mjera je sposobnosti čvrstog tijela da vodi toplinu [8].

U stacionarnim uvjetima uz pretpostavku linearnog temperaturnog profila te uz stabilnu vrijednost koeficijenta toplinske vodljivosti, moguće je temperaturni gradijent napisati [11]:

$$\frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} \quad (6)$$

U uvjetima nestacionarne kondukcije, temperatura se mijenja s vremenom, a energija koja se dovodi ili odvodi od tijela, tj. količina akumulirane energije iznosi:

$$Q = mc_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7)$$

gdje je  $m$  masa tijela [kg],  $c_p$  je specifični toplinski kapacitet [J/kgK], a  $\frac{\partial T}{\partial t}$  je promjena temperature s promjenom vremena u sve tri dimenzije tijela.

Specifični toplinski kapacitet tvari,  $c_p$  [J/kgK] je fizikalna veličina koja opisuje svojstvo tvari da pri izmjeni topline mijenja temperaturu [12]. Što je specifični toplinski kapacitet tvari veći, to će biti potrebno više energije dovesti jednom kilogramu te tvari da joj se temperatura promijeni za jedan kelvin.

Nestacionarna kondukcija opisuje se drugim Fourierovim zakonom (jednadžba 8). Ovom je parcijalnom diferencijalnom jednadžbom (8) opisano trodimenzionalno provođenje topline i nestacionarnost procesa, dok je primjerice moguća generacija topline izostavljena:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T \quad (8)$$

gdje je  $a$  [m<sup>2</sup>/s] toplinska difuzivnost koja se definira kao brzina promjene temperature [9]:

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (9)$$

a  $\nabla^2 T$  predstavlja parcijalnu promjenu temperature s  $x$ ,  $y$  i  $z$  prostornim koordinatama, a  $\nabla^2$  je Laplaceov operator koji skraćuje oblik jednadžbe:

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (10)$$

#### 2.4.2.) Konvekcija

Konvekcija je vrtložni mehanizam prijenosa topline pri čemu se toplina prenosi grupama molekula. Karakteristična je za fluide u gibanju pri čemu se pod konvektivnim

prijenosom topline ne podrazumijeva samo izmjena u masi fluida nego, čak i značajnije, uključuje efekt kondukcije i strujanja fluida pri čemu pojedine čestice na različitim temperaturama dolaze u kontakt. Do prijenosa topline dolazi zbog gibanja toplih ili hladnih dijelova fluida između područja različitih temperatura [8]. Konvekcija može biti prirodna, kod koje dolazi do spontanog miješanja fluida zbog lokalnih razlika u gustoći koje su uzrokovane temperaturnim razlikama, i prisilna, kod koje je gibanje uzrokovano uređajima poput pumpi, miješalica, sl.

Izraz za količinu topline prenesenu sa fluida na čvrsto tijelo objedinjuje prvi Fourierov zakon koji opisuje prijenos topline kroz nepomičan granični sloj fluida uz stijenku čvrstog tijela i Newtonov zakon hlađenja koji opisuje prijenos topline vrtložnim mehanizmom s fluida na stijenku i glasi:

$$q = K\Delta T \quad (11)$$

gdje je  $q$  gustoća toplinskog toka [ $\text{W}/\text{m}^2$ ],  $\Delta T$  [K] je temperaturna razlika toplog i hladnog tijela, tj. srednja pokretačka sila procesa, a  $K$  [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ] je koeficijent prolaza topline koji predstavlja sumu recipročnih vrijednosti svih toplinskih otpora. Koeficijent prolaza topline u sebi sadrži koeficijent prijelaza topline,  $\alpha$  [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ], čija vrijednost kvantitativno definira brzinu izmjene topline konvekcijom, tj. jednaka je količini topline dovedene ili odvedene sa jedinične površine u jediničnom vremenu za razliku temperatura između tijela i okoliša od jednog stupnja i ovisi o čitavom nizu parametara te se najčešće određuje eksperimentalno. Koeficijent prolaza topline sastavni je dio Newtonovog zakona hlađenja koji glasi [9].:

$$q = a\Delta T \quad (12)$$

#### 2.4.3.) Radijacija

Toplinsko zračenje je direktna posljedica kretanja atoma i molekula sastavljenih od nabijenih čestica pri čemu gibanje rezultira elektromagnetskim zračenjem koje odvodi energiju od površine. Energija se prenosi elektromagnetskim valovima različitih valnih duljina, a poseban značaj imaju oni valovi koji se nakon apsorpcije drugog tijela (koje prima energiju) ponovno pretvaraju u toplinsku energiju [9].

## 2.5.) Termoelektričnost

### 2.5.1) Seebeckov efekt

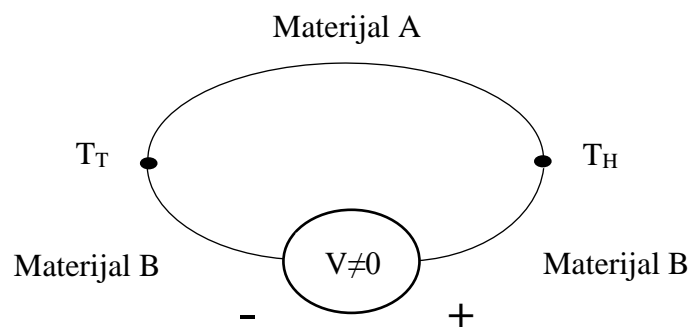
Seebeckov efekt opisuje pojavu stvaranja električnog napona otvorenog električnog strujnog kruga koji se sastoji od dva različita vodiča ili poluvodiča čija se spojišta nalaze na različitim temperaturama. Nastala razlika potencijala proporcionalna je temperaturnoj razlici te glasi:

$$U = S_{AB}\Delta T \quad (13)$$

gdje je  $\Delta T = T_T - T_H$  [K], odnosno razlika toplog i hladnog spojišta,  $U$  je napon [V], a  $S_{AB}$  je relativan Seebeckov koeficijent koji se najčešće mjeri u  $\mu\text{V/K}$ . Relativni Seebeckov koeficijent je zapravo razlika apsolutnih Seebeckovih koeficijenata materijala A i B:

$$S_{AB} = S_A - S_B \quad (14)$$

U praksi se obično, radi praktičnosti, koristi vrijednost relativnog Seebeckovog koeficijenta zato što se on određuje voltmetrom, a apsolutne Seebeckove koeficijente je potrebno izračunati iz Thomsonovog koeficijenta [13]. Vrijednosti Seebeckovih koeficijenata ovise o vrsti materijala i o temperaturi.



**Slika 2.** Shematski prikaz Seebeckovog efekta

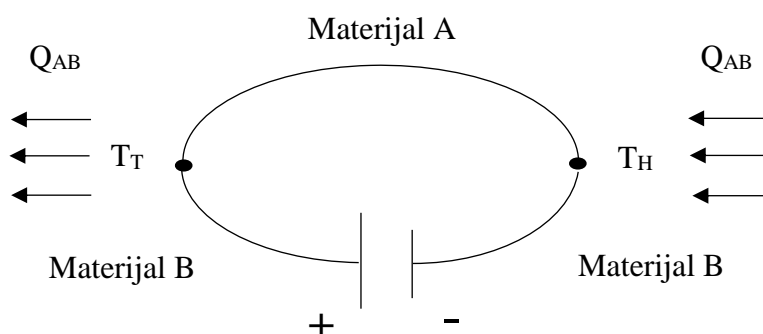
### 2.5.2) Peltierov efekt

Prolaskom struje kroz zatvoreni električni strujni krug sačinjen od dva različita vodiča ili poluvodiča uzrokuje hlađenje na jednom, kao rezultat apsorpcije topline te grijanje, kao rezultat oslobađanja topline, na drugom spojištu. Smjer struje određuje koje će se spojište grijati, a koje hladiti. Taj fenomen naziva se Peltierov efekt i on je suprotan od Seebeckovog efekta. Količina topline koja je apsorbirana ili oslobođena proporcionalna je električnoj struji i Peltierovom koeficijentu [13]:

$$Q = \pi_{AB} I \quad (15)$$

gdje je  $Q$  količina topline [J],  $I$  jakost električne struje [A], a  $\pi_{AB}$  Peltierov koeficijent čiji predznak ovisi o smjeru električne struje. Kod negativnog predznaka Peltierovog koeficijenta,  $\pi_{AB} < 0$ , toplinski tok i tok električne struje su različitog smjera dok kod pozitivnog predznaka Peltierovog koeficijenta,  $\pi_{AB} > 0$ , toplinski tok i tok električne struje istog su smjera [13].

Peltierovo grijanje ili hlađenje je reverzibilan proces što znači da će grijanje (ili hlađenje) proizvesti električnu struju, a električna struja će proizvesti grijanje (ili hlađenje) bez gubitka energije [13]. Peltierov efekt se po tome razlikuje od Jouleove topline koja je ireverzibilna, a ona se također javlja kao rezultat prolaska električne struje kroz električni strujni krug.



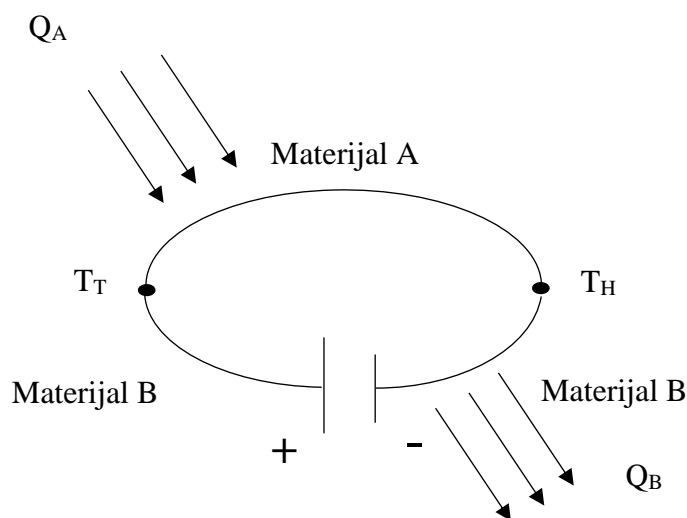
**Slika 3.** Shematski prikaz Peltierovog efekta

### 2.5.3.) Thomsonov efekt

William Thomson (poznatiji kao Lord Kelvin) je matematički opisao odnos između prethodna dva fenomena, ali je također uočio još jedan fenomen koji je postao poznat kao Thomsonov efekt, a govori o apsorpciji ili oslobađanju topline u homogenom i vodljivom materijalu kroz kojeg teče struja te u kojem postoji temperaturni gradijent [14]. Taj novi toplinski tok postoji uz Jouleovu toplinu, samo što je on reverzibilan za razliku od ireverzibilnog Jouleovog grijanja. Količina topline opisana u ovom fenomenu glasi:

$$Q = \tau I \frac{\partial T}{\partial x} \quad (16)$$

gdje je  $Q$  količina topline [J],  $\tau$  je Thomsonov koeficijent,  $I$  je količina električne struje [A], a  $\frac{\partial T}{\partial x}$  je temperaturni gradijent.



**Slika 4.** Shematski prikaz Thomsonovog efekta



## 2.6.) Jouleova toplina

Jouleova toplina je transformacija električne energije u toplinsku, a uzrokovana je pojavom električnog otpora kojeg svaki realni vodič pruža prolasku električne struje kroz njega [15]. Joule je ovu kvalitativnu pojavu također kvantitativno izučavao te ju matematički formulirao i time je dobiven Jouleov zakon koji kaže da je toplina pretvorena iz električne energije proporcionalna naponu  $U$  [V], električnoj struji  $I$  [A] i vremenu  $t$  [s]:

$$Q = UIt \quad (17)$$

Uzevši u obzir Ohmov zakon,  $U = IR$ , gdje je  $R$  električni otpor [ $\Omega$ ], gornja se jednadžba može napisati na sljedeći način:

$$Q = I^2 R t \quad (18)$$

Desna strana oba prethodna izraza može se shvatiti kao električna energija koja je dovedena otporniku, tj. trošilu, te se može koristiti općenito za izračunavanje ukupne električne energije ili specifično u slučaju određivanja količine topline transformirane iz električne energije [15].

Snaga,  $P$  [W], je fizikalna veličina koja opisuje brzinu prenošenja energije [16], a u slučaju istosmjerne struje iznosi:

$$P = I^2 R \quad (19)$$

## 2.7.) Prilagođenje za maksimalnu snagu

Za postizanje maksimalne snage (energije) koju prima trošilo od realnog izvora, dakle od izvora s unutrašnjim otporom, potrebno je izvor spojiti na trošilo koje posjeduje otpor jednak unutrašnjem otporu izvora. U ovom slučaju, jednaka će se energija trošiti na izvoru kao i na trošilu te će iskorištenje izvora biti jednako 50% [17].

Pomoću Peltierovog elementa izloženog određenom gradijentu temperature dobije se određeni napon odnosno struja u električnom krugu. Otpornik jednakog otpora onom unutrašnjem otporu Peltierovog elementa, iz izoliranog sustava u kojemu nastaje temperaturna oscilacija može „izbaciti“ maksimalno  $\frac{1}{2}$  električne energije pretvorene u toplinsku energiju, od ukupne topline koja prolazi kroz Peltierov element. U teoriji je to moguće zbog

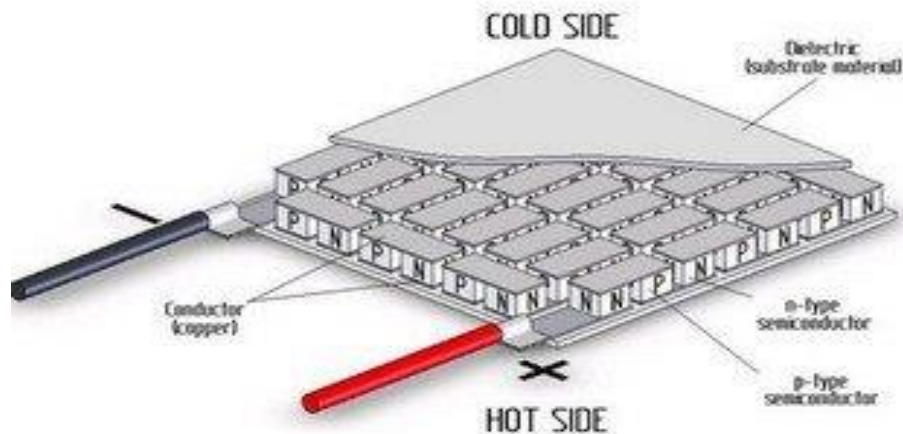
reverzibilnosti Seebeckovog efekta, dakle  $\frac{1}{2}$  topline pretvorene u električnu energiju od topline koja prolazi kroz Peltierov element pretvorila bi se u toplinsku energiju *na vanjskom trošilu* [17].



**Slika 5.** Shematski prikaz strujnog kruga Peltierovog elementa i trošila

## 2.8.) Peltierov element

Termoelektrični uređaji funkcioniraju na principu Peltierovog efekta i nazivaju se Peltierovi elementi te se najčešće koriste kao rashladni uređaji, tj. njihov zadatak je, korištenjem električne struje, prenijeti toplinu od izvora do ponora topline i time stvoriti temperaturnu razliku između gornje i donje strane uređaja. Takvi uređaji sastoje se od dva različita (n- i p-tip) poluvodiča koji su međusobno povezani dobrim vodičem (najčešće bakrom) te omeđeni keramičkim pločicama koji djeluju kao električni izolator, ali također pridonose robustnosti uređaja (Slika 5). U Peltierovom elementu nalazi se veliki broj termoparova koji su termički spojeni paralelno, a električki serijski. Zahvaljujući takvom spajanju, moguće je postići grijanje jedne, a hlađenje druge strane prolaskom električne struje. Prolaskom elektrona iz p-tipa poluvodiča u n-tip poluvodiča kroz električni vodič, elektroni prelaze iz područja niže energije u područje više energije uz apsorpciju toplinske energije, dakle ta strana djeluje kao ponor topline i ona se hladi. Prolaskom elektrona iz n-tipa poluvodiča u p-tip poluvodiča kroz električni vodič, elektroni prelaze iz područja više energije u područje niže energije pri čemu oslobađaju toplinsku energiju ponoru topline, dakle ta se strana grije [18].



**Slika 6.** Shematski prikaz Peltierovog elementa [18]

### 3.) EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio ovoga rada podijeljen je u nekoliko dijelova:

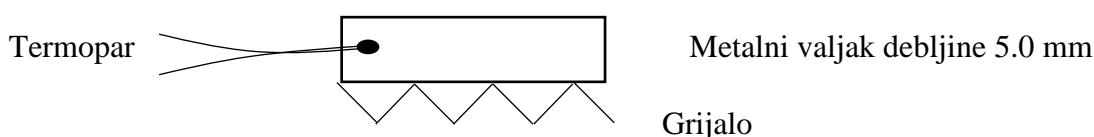
- A) Odabir i obrada materijala za izvor i ponor topline
- B) Odabir osjetila temperature
- C) Provjeravanje učinka korištenja termovodljive paste
- D) Kvalitativno praćenje prijenosa topline kroz više slojeva materijala
- E) Provjera učinka trošila na prijenos topline kroz Peltierov element
- F) Procjena specifičnog toplinskog kapaciteta sustava i Peltierovog elementa

A) Za ovaj eksperimenta, bilo je nužno ispitivanja provoditi na materijalu poznatih toplinskih svojstva. Odabrana je legura aluminija (AlCuMgSi1), geometrijskog oblika valjka čija je baza promjera 60.0 mm, čija su fizikalna i toplinska svojstva, relevantna za ovaj rad, navedena od strane proizvođača. Materijal je bio narezan na komade različitih debljina (5.0–50.0 mm) te je svaki imao određeni broj izbušenih rupa, za ulazak termopara, promjera 2.0 mm i dubine 20.0 mm (fotografija u Prilogu). Površine svakog uzorka su strojno izgladene i ispolirane radi smanjivanja kontaktnog otpora prijenosu topline. Svakom uzorku izmjerena je masa i visina.

Odlučeno je da će najdeblji uzorak biti korišten kao izvor topline, a različiti tanji će biti korišteni kao ponori topline za različita ispitivanja.

**B)** Temperatura je mjerena termoparovima. Na raspolaganju su postojala dva K-tipa termopara različitih dimenzija: jedna je bio deblji (promjera 0.5 mm, fotografija u Prilogu), a drugi tanji (promjera 0.2 mm, fotografija u Prilogu). Ispitano je koji bi termopar bio pogodniji za korištenje u ovom eksperimentu na način da se primarno pratio odziv na skokomičnu promjenu temperature. Oba termopara su stavljena u istu rupu istog uzorka legure te je praćen odziv tijekom grijanja i određeno je vremensko kašnjenje odziva, tzv. mrtvo vrijeme,  $\theta$  [ s ]. Vrijeme od početka uključivanja pobude do pojave odziva termopara je tzv. mrtvo vrijeme. Također, uspoređena je praktičnost oba termopara u smislu izvedbe aparature, lakoće korištenja i slično.

Ispitano je postoji li razlika u odzivu jednakih termoparova koji mjere temperaturu istog mjesta na način da su se dva termopara smjestila u istu rupu metalnog valjka nakon čega se izazvao prijenosa topline tako da se uzorak hladio.



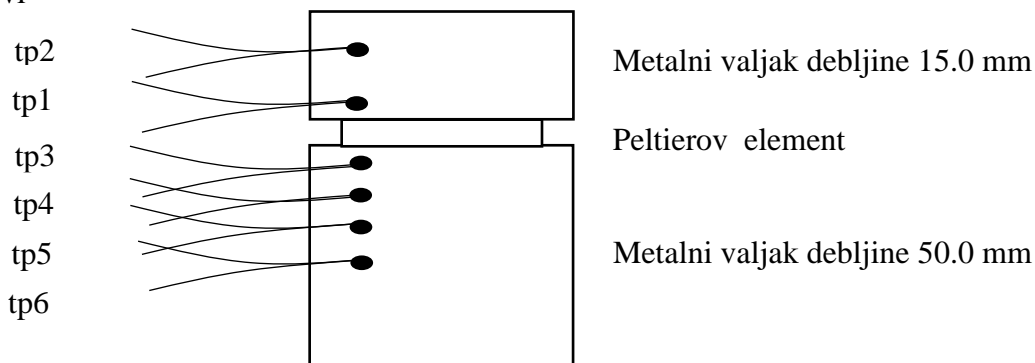
**Slika 7.** Shematski prikaz mjerenja

**C)** Površina legure aluminija je kvalitetno obrađena i moglo se pretpostaviti da su dva uzorka u savršenom termalnom kontaktu, tj. da je kontaktni otpor prijenosu topline zanemariv, ali površina Peltierovog elementa, s kojim su uzorci legure bili u dodiru, je keramička i hrapava. Ispitivanje učinka korištenja termovodljive paste, poznatih toplinskih svojstva, za spajanje uzorka i Peltierovog elementa provodilo se na način da se određivala vremenska konstanta hlađenja, odnosno grijanja istog uzorka nakon isključenja jednake pobude Peltierovog elementa kod slučaja bez korištenja, a zatim sa korištenjem termovodljive paste. Za ovaj dio

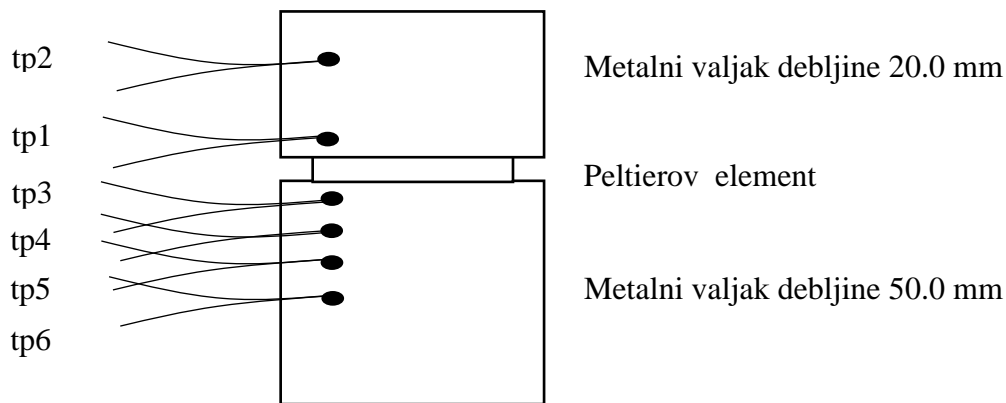
eksperimenta koristili su se metalni valjci debljine 15.0 mm i 20.0 mm. Kod ispitivanja učinka termovodljive paste, provjeravala se ponovljivost mjerenja.

Mjerenjem ovisnosti temperature o vremenu te određivanjem vremenske konstante prijelazne pojave, provjerilo se je li bolje grijati ili hladiti uzorak. U ovom dijelu eksperimenta korišteni su metalni valjci debljine 50.0 mm i 5.0 mm s korištenjem termovodljive paste, smješteni između Peltierovog elementa koji je prvo grijao tanji uzorak, a zatim ga je hladio.

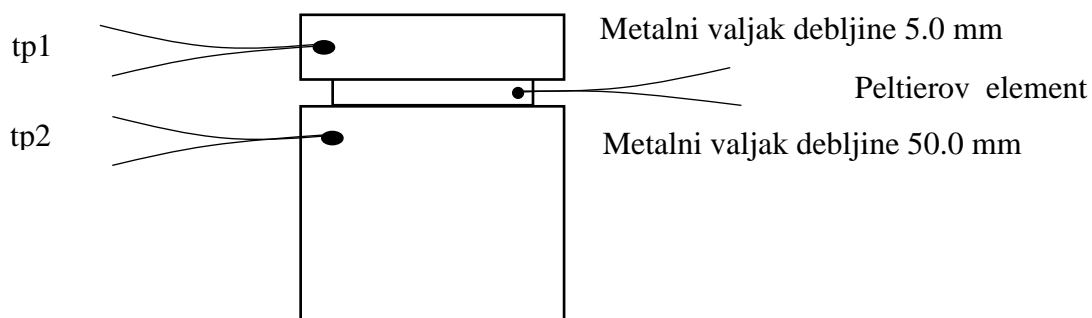
Termoparovi



Termoparovi

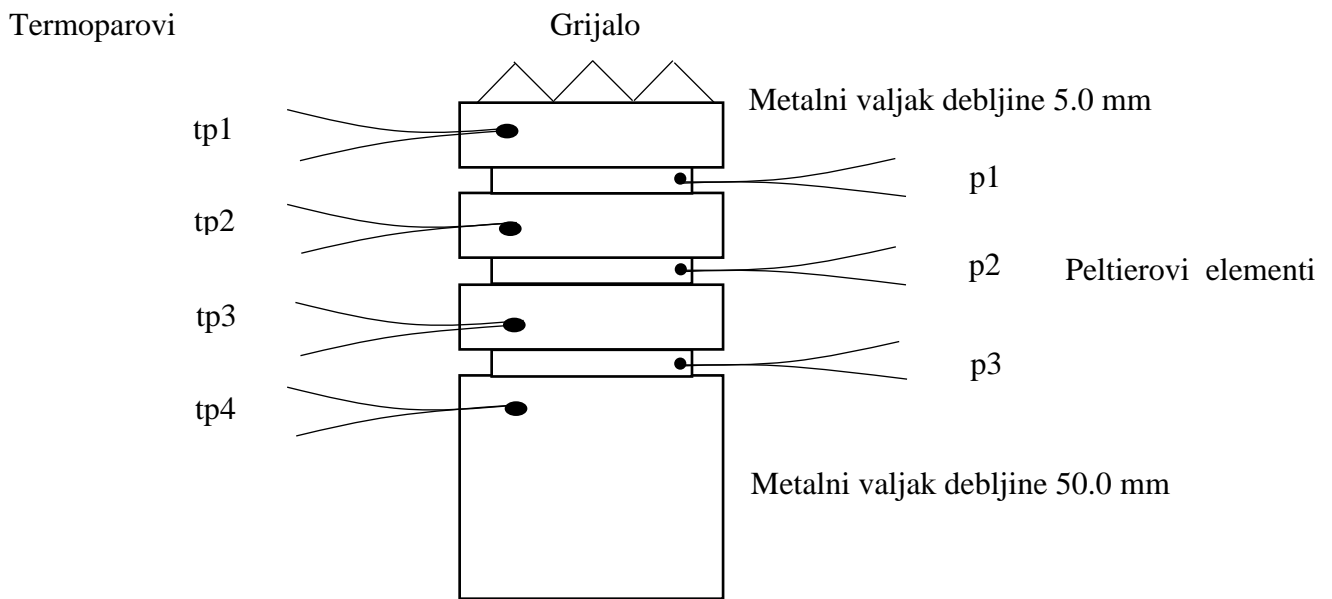


Termoparovi



**Slika 8.** Shematski prikaz oba mjerenja

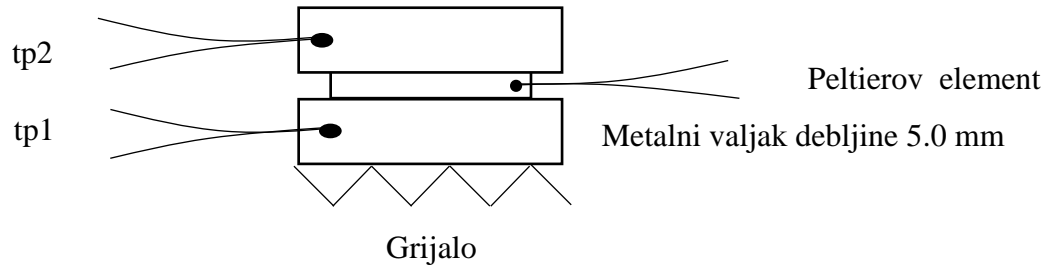
D) Prilikom uključivanja grijala, mjerena je promjena temperature s vremenom u metalnim valjcima pomoću termoparova te promjena napona s vremenom u Peltierovim elementima. Napon koji je bio stvoren u Peltierovim elementima prouzročena je pojavom temperaturnog gradijenta (Seebeckov efekt). Metalni uzorci i Peltierovi elementi bili su naizmjenice složeni, a na vrhu se nalazio grijač.



Slika 9. Shematski prikaz mjerenja

E) Mogućnost „izbacivanja“ dijela topline iz sustava na vanjskom trošilu provedeno je korištenjem spiralnog grijala načinjenog od otporničke žice zalijepljene obostrano ljepljivom trakom na donji dio najtanjeg metalnog valjka (debljine 5.0 mm) na kojemu se nalazio Peltierov element u serijskom spoju s otpornikom (Slika 7.), odnosno trošilom, čiji je otpor jednak unutrašnjem otporu Peltierovog elementa,  $R = 2,2 \Omega$ , te se na kraju nalazio još jedan metalni valjak iste debljine kao i prvi. Ispitivanje je provedeno na način da se sustavu dovede određena količina topline kada trošilo nije spojeno te se prati odziv termoparova i Peltierovog elementa. Zatim se sustavu dovede jednaka količina topline, ali Peltierov element je spojen na trošilo te se također prati odziv termoparova i Peltierovog elementa, ali na trošilu.

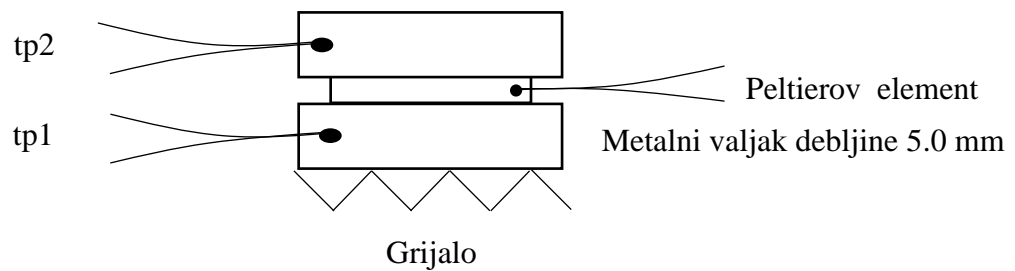
Termoparovi



**Slika 10.** Shematski prikaz mjerenja

F) Ispitivanja se provode na isti način kao u prethodnom dijelu.

Termoparovi

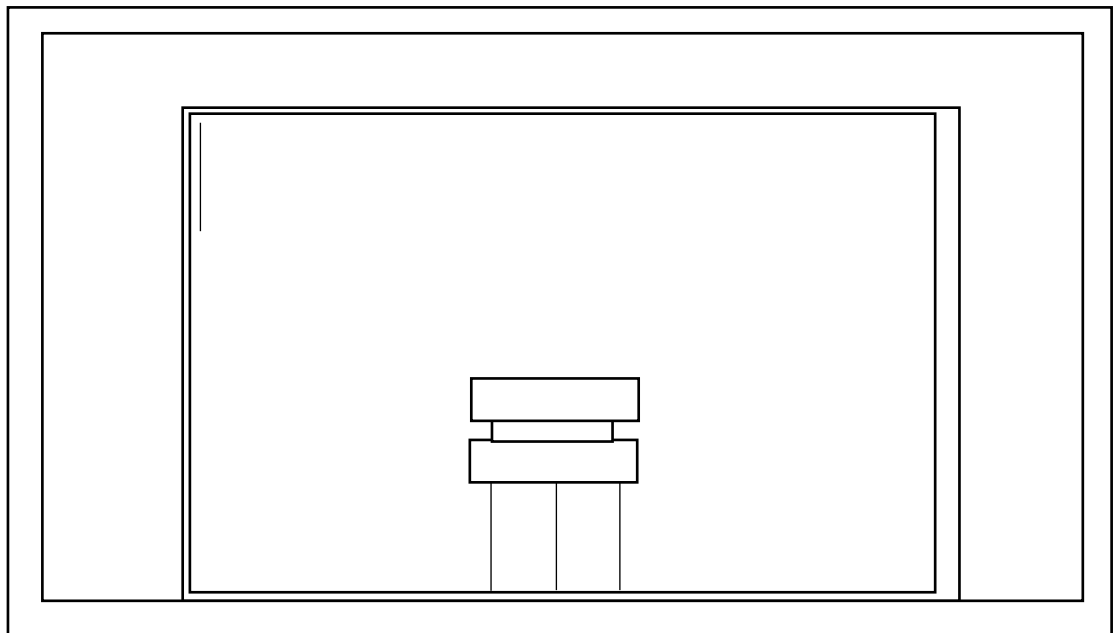


**Slika 11.** Shematski prikaz mjerenja

Ispitivanja bila su provedena u izolaciji radi maksimalnog mogućeg smanjenja utjecaja okoline. Izolacija se sastojala od vanjske kutije od stiropora unutar koje se nalazila još jedna kartonska kutija, a svi uzorci su bili postavljeni na plastičnom tronošću.



**Slika 12.** Fotografija prostora za mjerenja



**Slika 13.** Presjek izolacije unutar koje su se provodila mjerenja



Poznata su sljedeća svojstva materijala korištena u eksperimentu:

$$\lambda (\text{AlCuMgSi1}) = 134,0 \text{ W/mK}$$

$$c_p(\text{AlCuMgSi1}) = 894,00 \text{ J/kgK}$$

$$\rho (\text{AlCuMgSi1}) = 2,79 \text{ kg/m}^3$$

$$c_p(\text{termovodljiva pasta}) = 1004,16 \text{ J/kgK}$$

$$R (\text{Peltierov element}) = 2,2 \Omega$$

$$R (\text{trošilo}) = 2,2 \Omega$$

#### 4.) REZULTATI

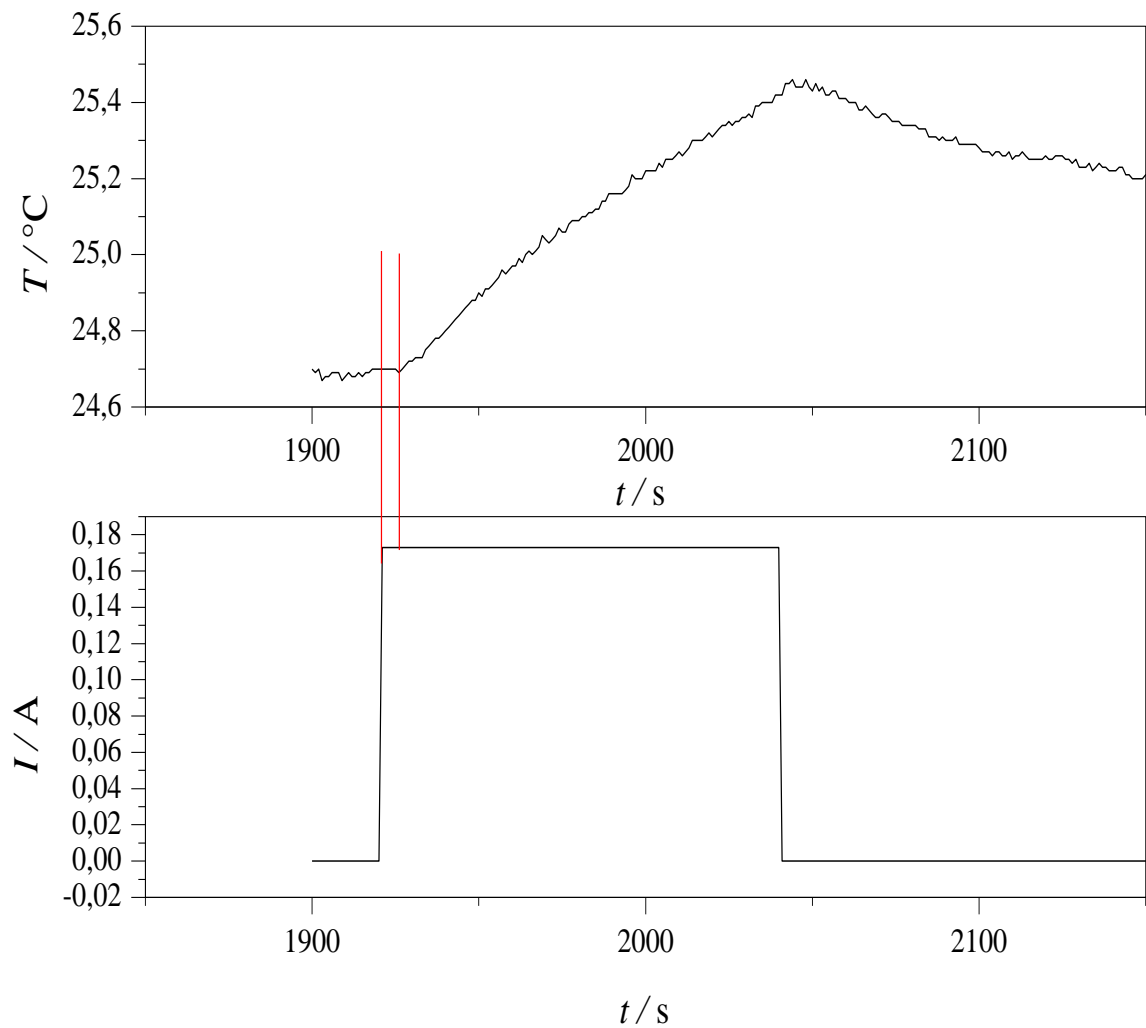
Prikaz grafičkih i tabličnih podataka podijeljeni su u iste sekcije kao i opisi provođenja eksperimenta.

Izračun vremenske konstante provodio se u programskom paketu *OriginPro 8*, a mjerni podaci su bili utočnjavani modelom kojega opisuje funkcija oblika:

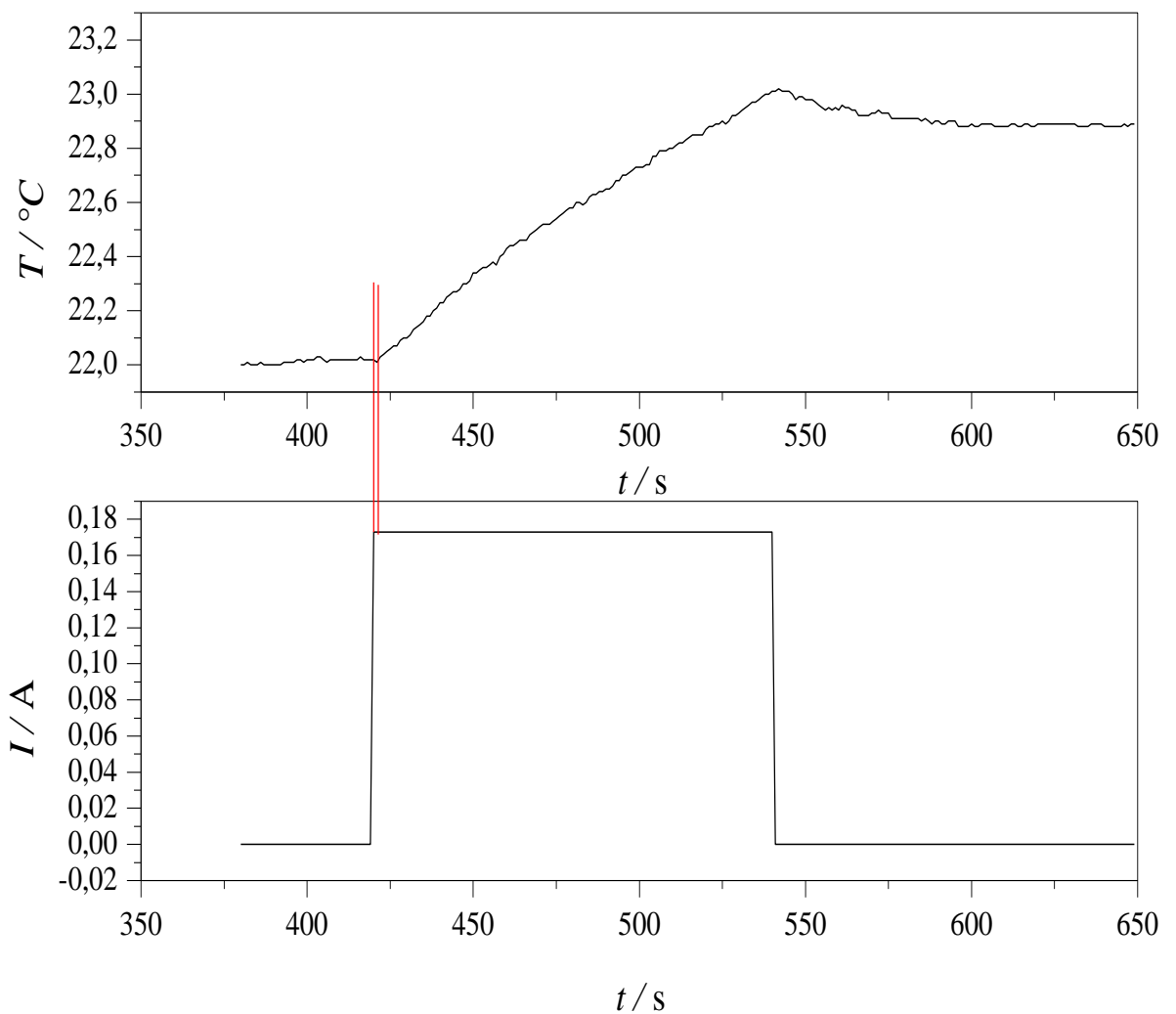
$$y = ae^{-\frac{x}{\tau}} + y_0 + kx \quad (20)$$

Gdje je  $\tau$  [ s ] vremenska konstanta,  $k$  je konstanta koja je dio člana  $kx$  koji predstavlja korekciju učinka spore promjene temperature unutar toplinski izolirane kutije uzrokovane promjenom temperature u laboratoriju

## B) Odabir osjetila temperature



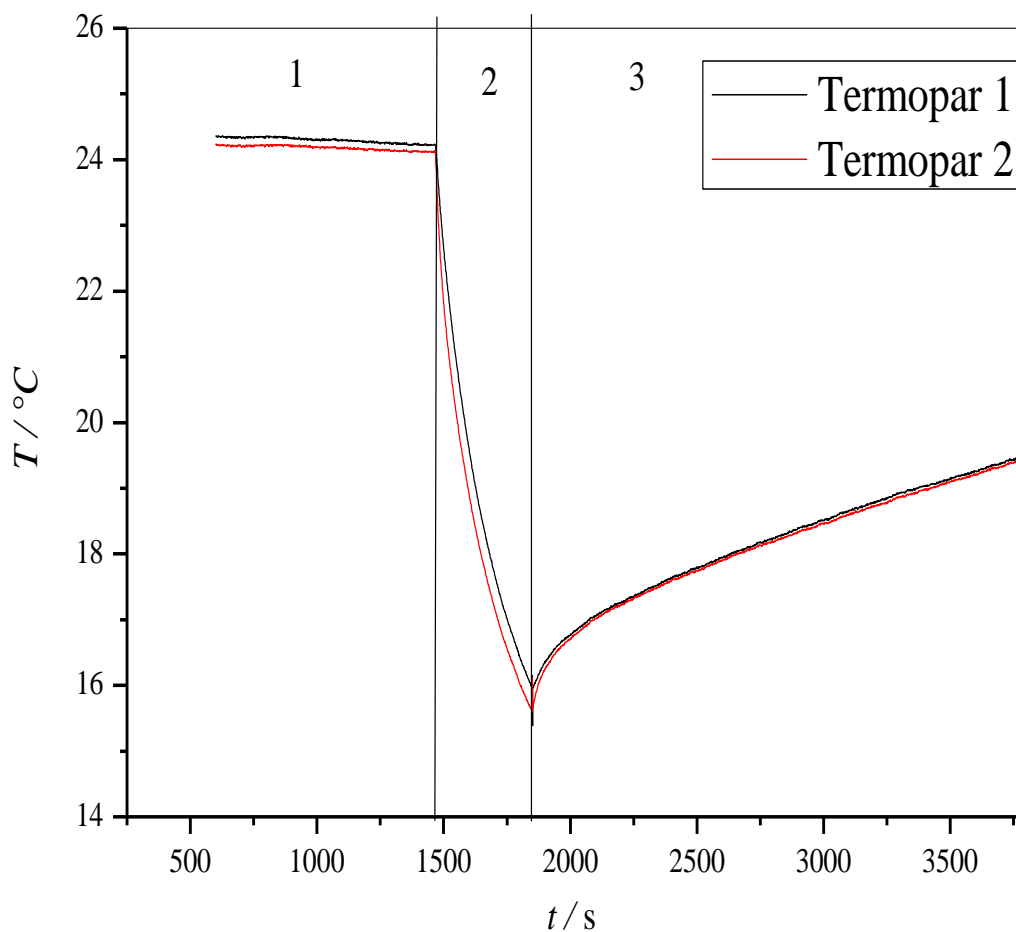
**Slika 14.** Odziv debljeg termopara na skokomičnu promjenu pokretanja grijača dovođenjem električne struje jakosti 0,173 A



**Slika 15.** Odziv tanjeg termopara na skokomičnu promjenu pokretanja grijača dovođenjem električne struje jakosti 0,173 A

**Tablica 1.** Prikaz vrijednosti mrtvog vremena za deblji i tanji termopar nakon izazvane skokomične pobude

	Deblji termopar	Tanji termopar
$\tau / s$	6	1



**Slika 16.** Prikaz mjerenja odziva dva tanja termopara koja se nalaze u istoj rupi metalnog valjka koji je podvrgnut hlađenju

**Tablica 2.** Prikaz srednjih vrijednosti razlike izmjerenih temperatura termopara 1 i 2 za područje stabilizacije ( 1 ), područje pobude hlađenja ( 2 ) i područje prekida pobude ( 3 )

$\Delta T_{\text{srednja}} ( 1 ) / ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{srednja}} ( 2 ) / ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{srednja}} ( 3 ) / ^\circ\text{C}$
0.13	0.58	0.05

### C) Provjeravanje učinka korištenja termovodljive paste

Legenda ( Slika 8. ):

Termopar 1 – tp 1

Termopar 2 – tp 2

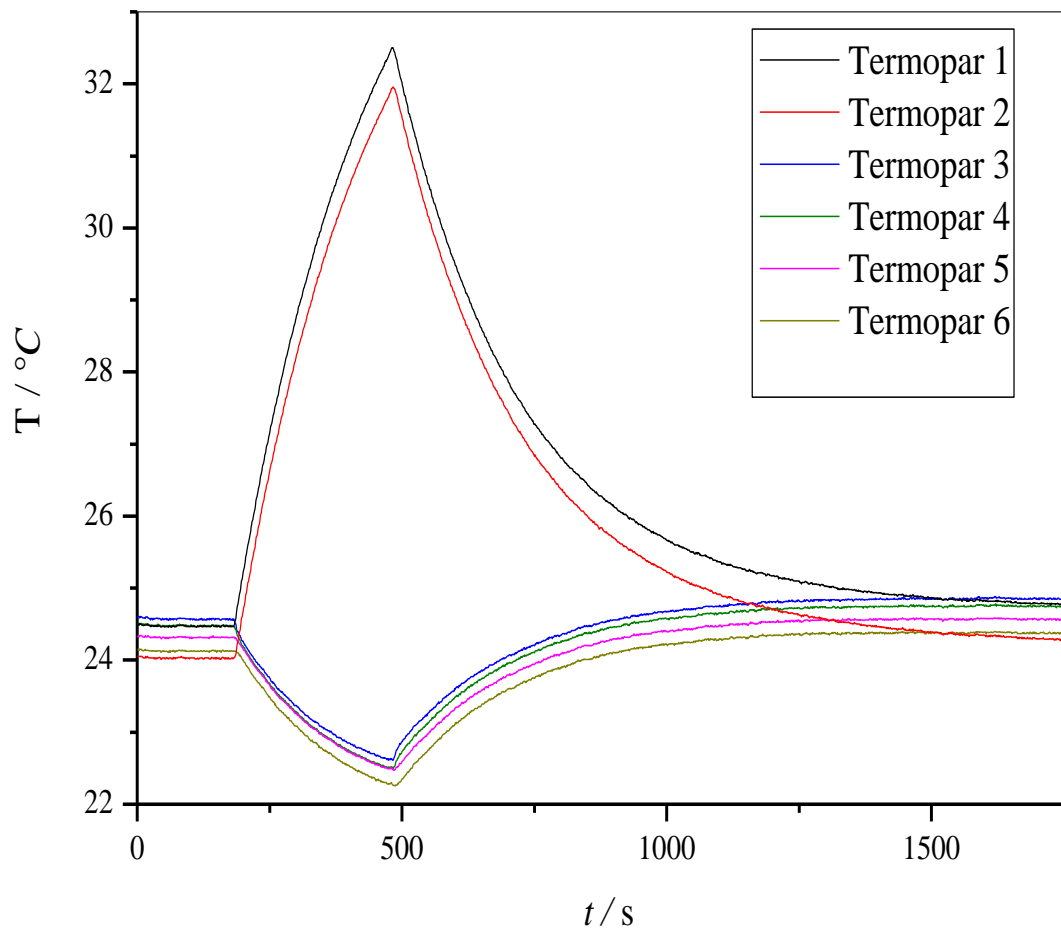
Termopar 3 – tp 3

Termopar 4 – tp 4

Termopar 5 – tp 5

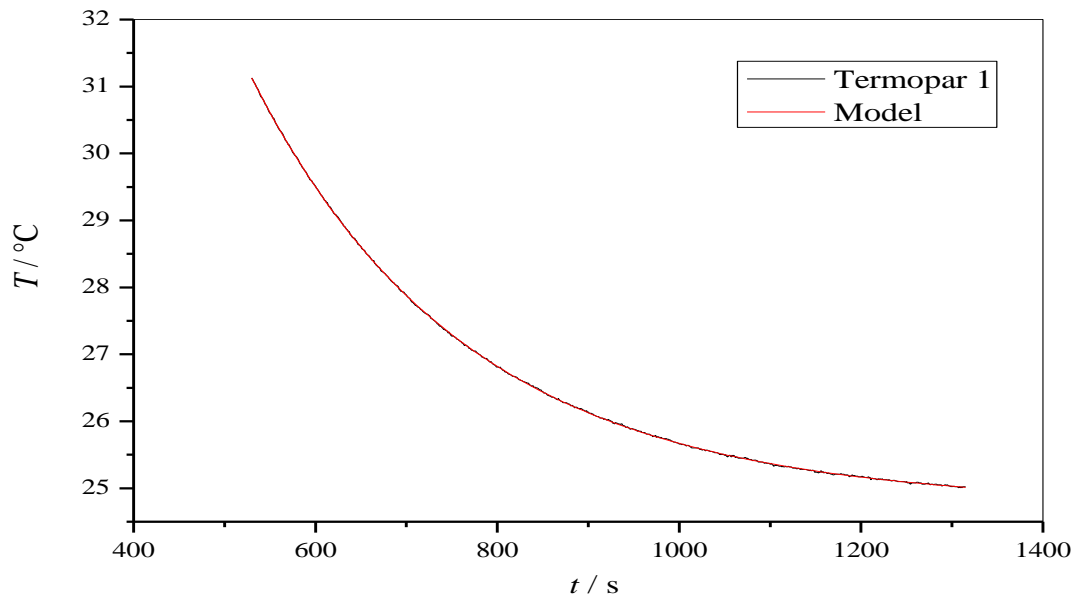
Termopar 6 – tp 6

1) Metalni valjci debljine 15.0 mm bez termovodljive paste

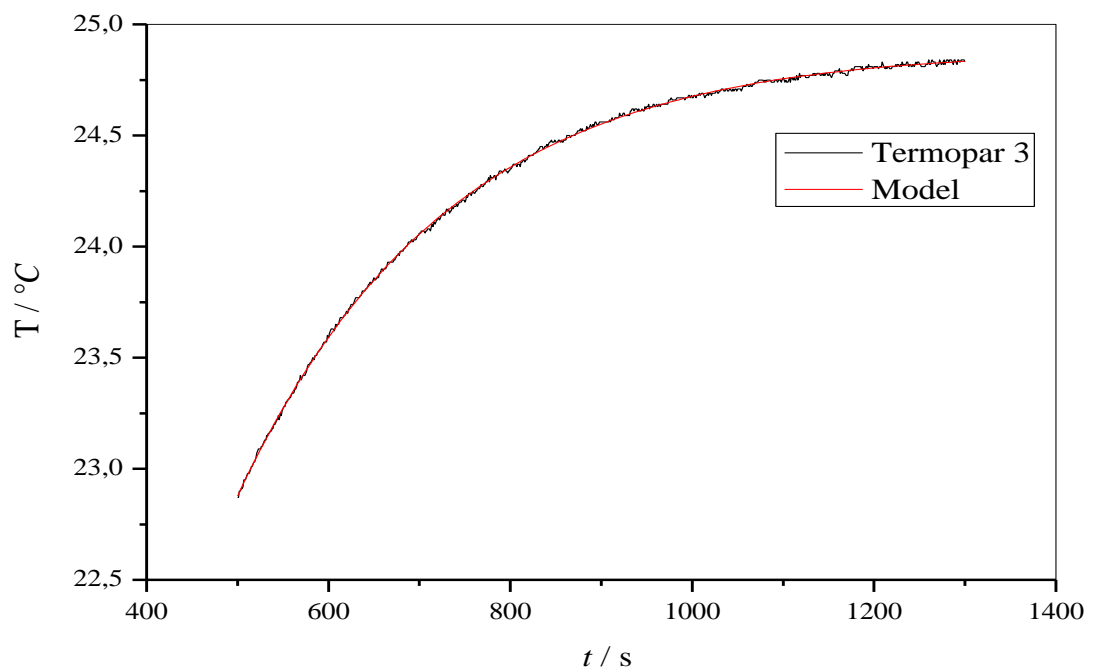


**Slika 17.** Prikaz promjene temperature metalnog valjka bez korištenja termovodljive paste na različitim udaljenostima od pobude Peltierovog elementa za električnu struju jakosti 0,5 A u trajanju od 5 min

Mjerni podaci i krivulja utočnjavanja zasebnih termoparova prikazani su samo za Termopar 1 i Termopar 3 zato što krivulje hlađenja, odnosno grijanja ta dva termopara reprezentativno pokazuju prijelaznu pojavu. Tablice sadržavaju sve relevantne podatke za ovaj dio eksperimenta i zorno ih prikazuju.

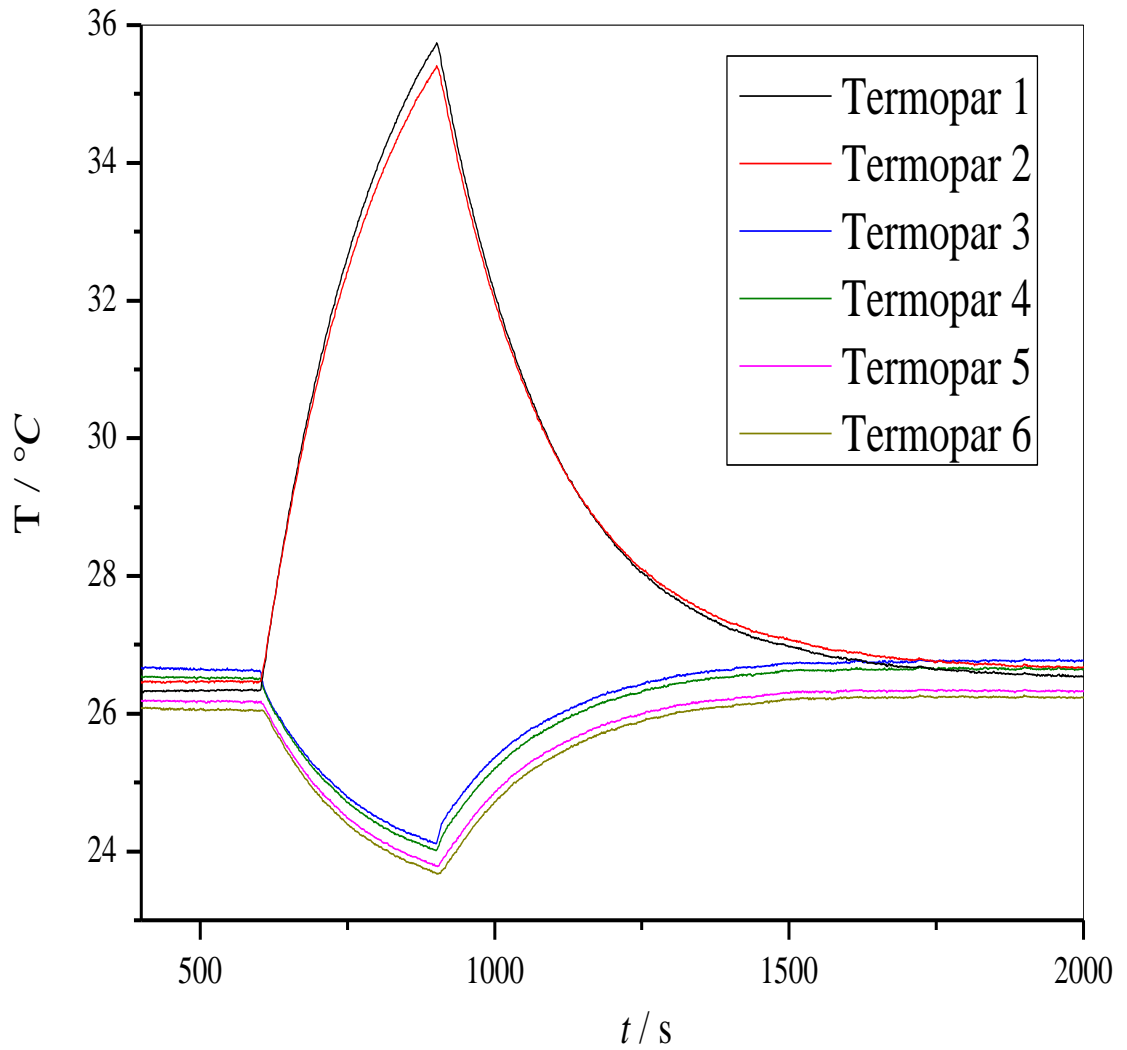


**Slika 18.** Utočnjavanje mjernih podataka bez korištenja termovodljive paste za termopar 1

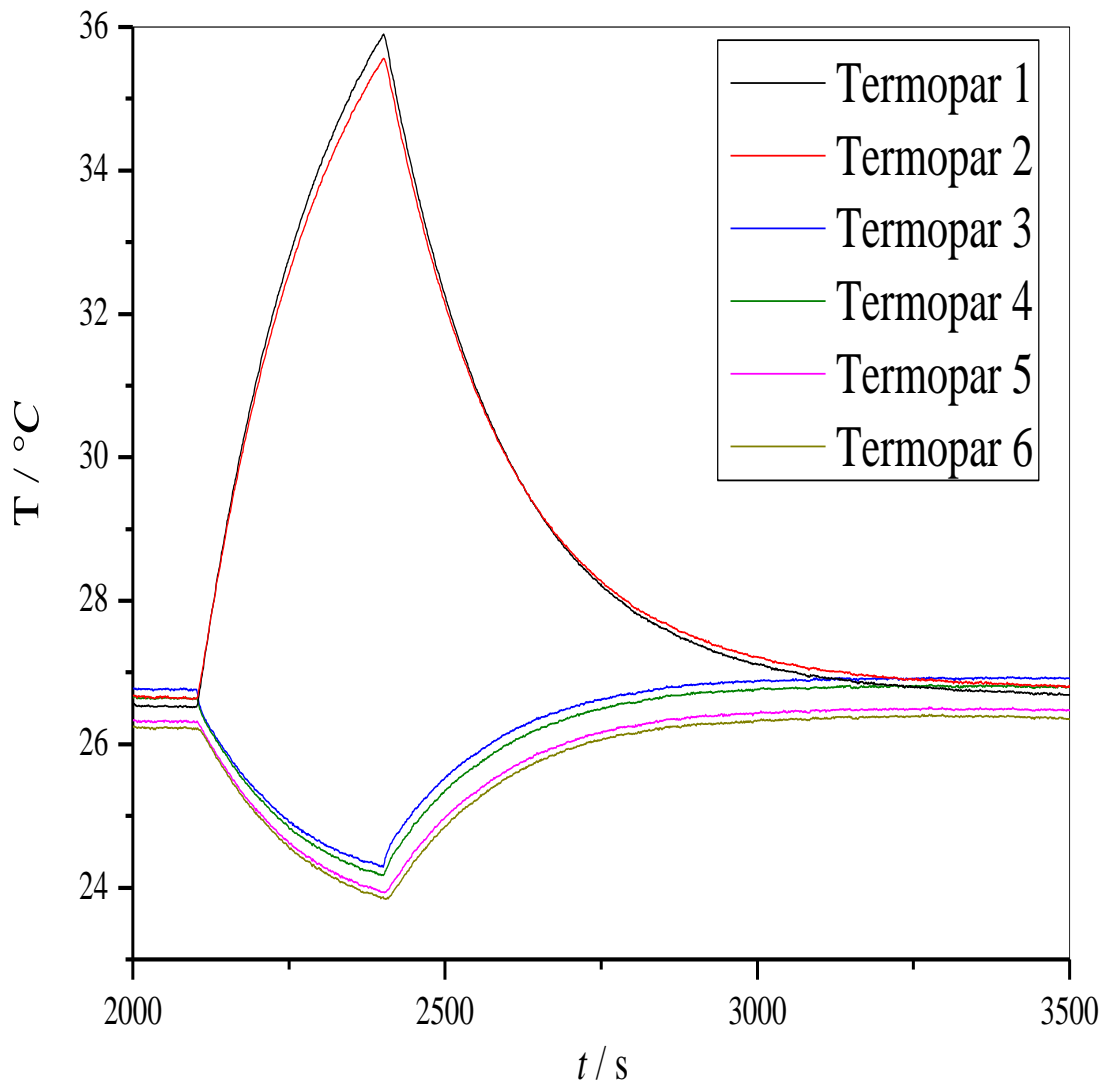


**Slika 19.** Utočnjavanje mjernih podataka bez korištenja termovodljive paste za termopar 3

2) Metalni valjci debljine 15.0 mm s korištenjem termovodljive paste.

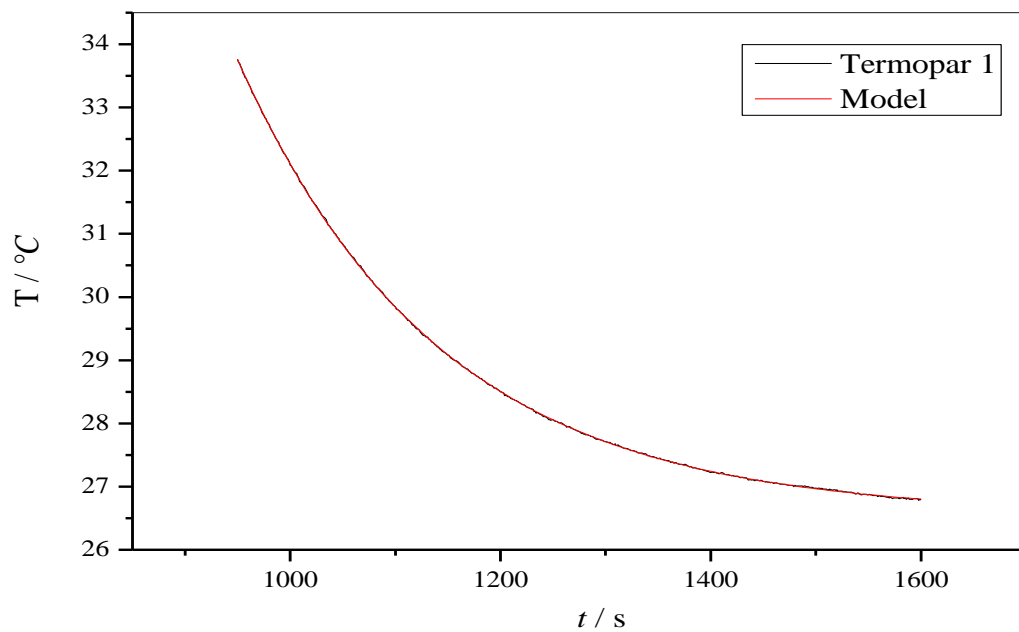


**Slika 20.** Prikaz promjene temperature metalnih valjaka s korištenjem termovodljive paste na različitim udaljenostima od pobude Peltierovog elementa za električnu struju jakosti 0,5 A u trajanju od 5 min

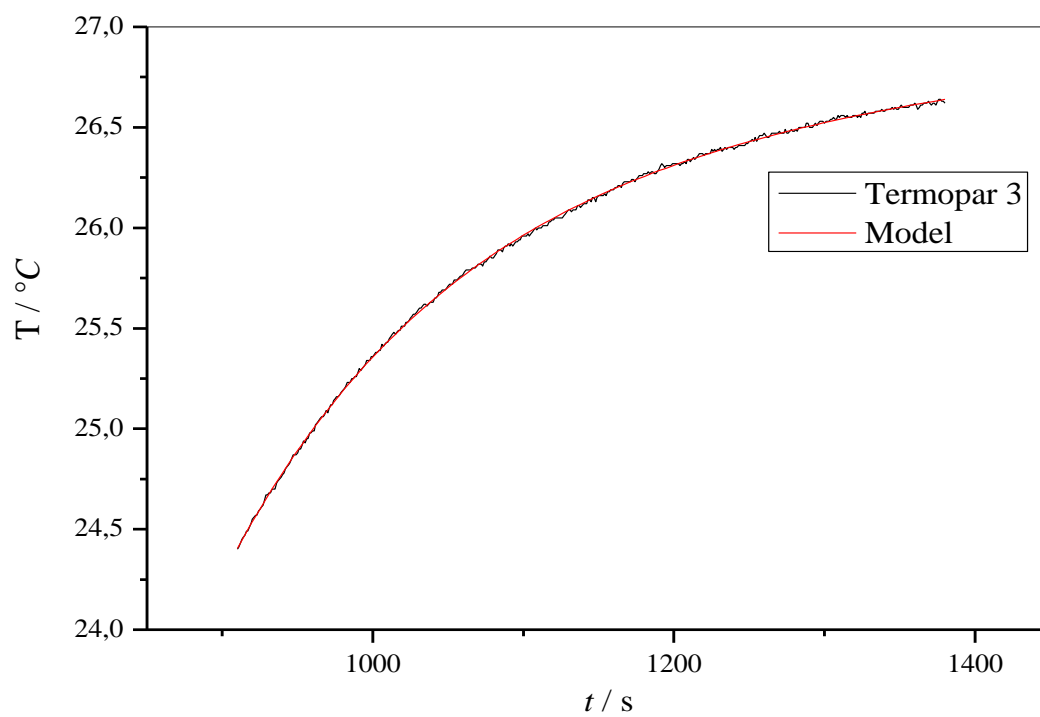


**Slika 21.** Prikaz promjene temperature metalnih valjaka s korištenjem termovodljive paste na različitim udaljenostima od pobude Peltierovog elementa za električnu struju jakosti 0,5 A u trajanju od 5 min neposredno nakon mjerenje u istim uvjetima





**Slika 22.** . Utočnjavanje mjernih podataka s korištenjem termovodljive za termopar 1



**Slika 23.** Utočnjavanje mjernih podataka s korištenjem termovodljive za termopar 3

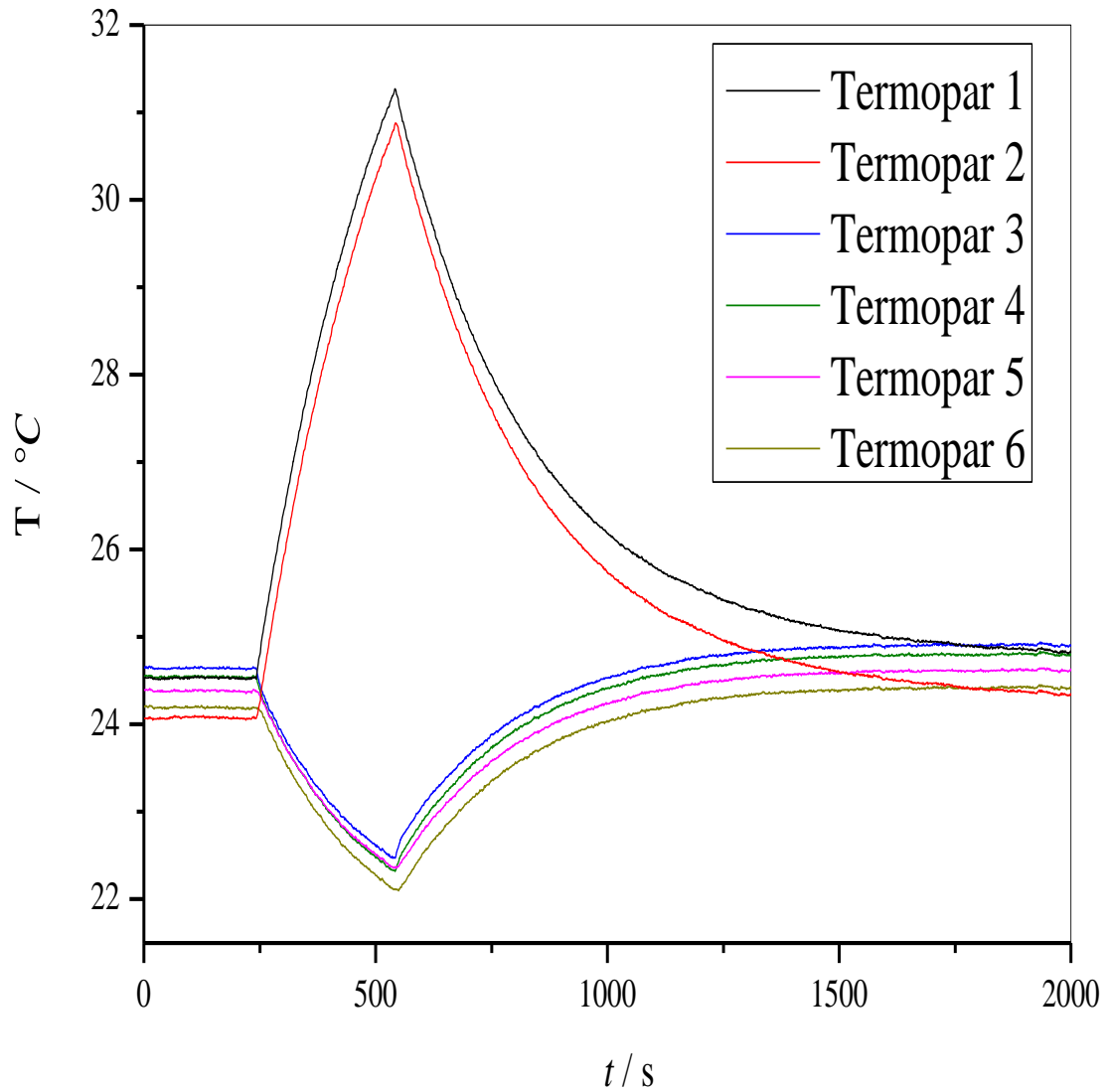
**Tablica 3.** Usporedba vrijednosti vremenske konstante, maksimalne postignute temperaturne razlike uzrokovane pobudom i  $R^2$  za mjerenja na metalnom valjku debljine 15.0 mm sa i bez korištenja termovodljive paste

Uzorak debljine 15.0 mm s pastom				Uzorak debljine 15.0 mm bez paste					
	$\tau / s$	$\Delta T / ^\circ C$	$R^2$		$\tau / s$	$\Delta T / ^\circ C$	$R^2$	$\Delta\tau_{aps} / s$	$\Delta\tau_{rel} / \%$
Tp 1	191.68	9.40	0.99997	Tp 1	231.30	8.03	0.99997	39.62	17.13
Tp 2	189.39	8.95	0.99996	Tp 2	233.76	7.92	0.99997	44.37	18.98
Tp 3	156.96	2.51	0.99978	Tp 3	235.21	1.96	0.99972	78.25	33.27
Tp 4	170.98	2.50	0.99977	Tp 4	231.64	1.99	0.99973	60.66	26.19
Tp 5	166.56	2.39	0.99974	Tp 5	229.36	1.85	0.99957	62.80	27.38
Tp 6	167.24	2.38	0.99969	Tp 6	222.44	1.87	0.99965	55.20	24.82

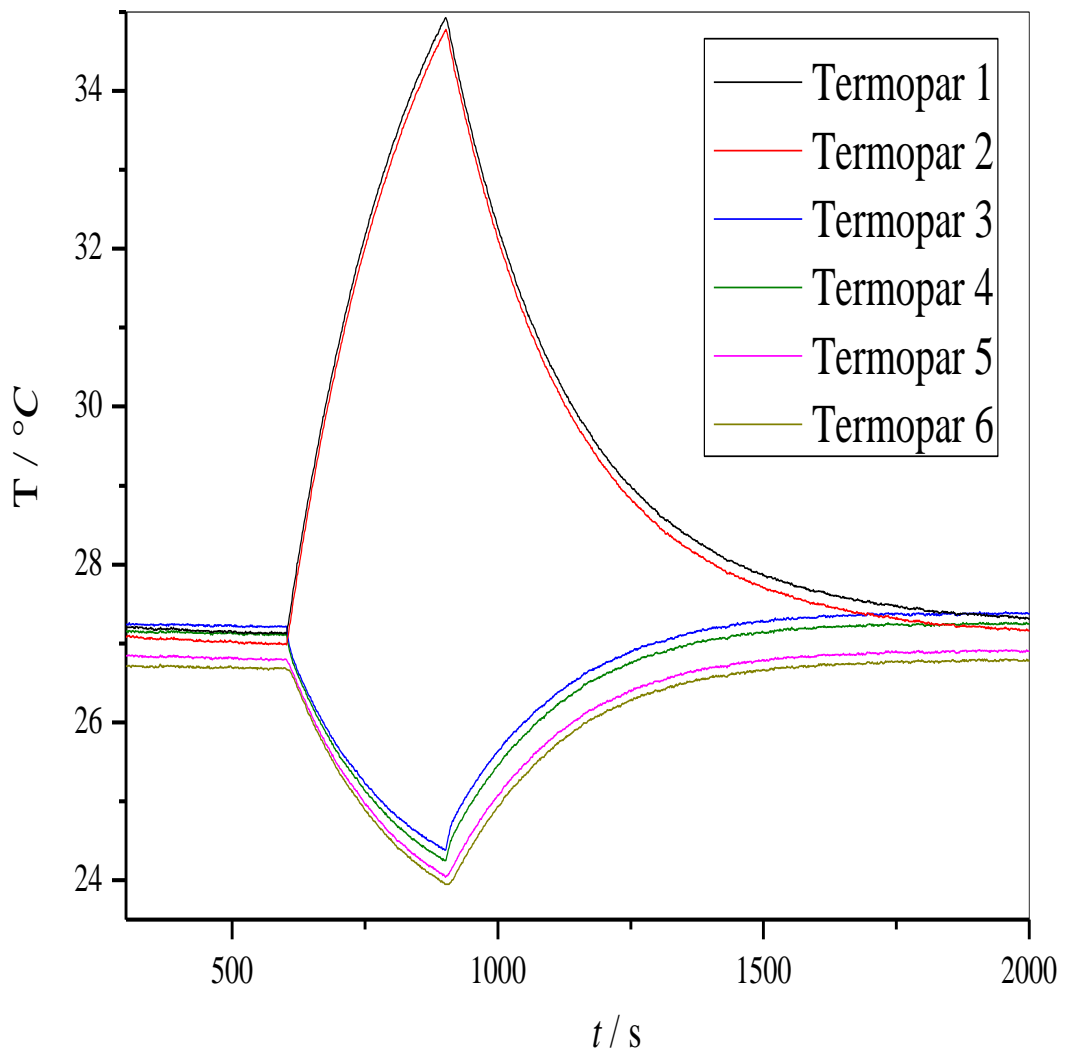
**Tablica 4.** Ponovljivost rezultata mjerenja na metalnom valjku debljine 15.0 mm s korištenjem termovodljive paste

Uzorak debljine 15.0 mm s pastom ( 1 )				Uzorak debljine 15.0 mm s pastom ( 2 )					
	$\tau / s$	$\Delta T / ^\circ C$	$R^2$		$\tau / s$	$\Delta T / ^\circ C$	$R^2$	$\Delta\tau_{aps} / s$	$\Delta\tau_{rel} / \%$
Tp 1	191.68	9.40	0.99997	Tp 1	186.72	9.38	0.99998	4.96	2.66
Tp 2	189.39	8.95	0.99996	Tp 2	186.92	8.92	0.99998	2.47	1.32
Tp 3	156.96	2.51	0.99978	Tp 3	175.29	2.47	0.99978	18.33	10.46
Tp 4	170.98	2.50	0.99977	Tp 4	188.66	2.47	0.99979	17.68	9.37
Tp 5	166.56	2.39	0.99974	Tp 5	215.06	2.38	0.99974	48.50	22.55
Tp 6	167.24	2.38	0.99969	Tp 6	205.63	2.37	0.99974	38.39	18.67

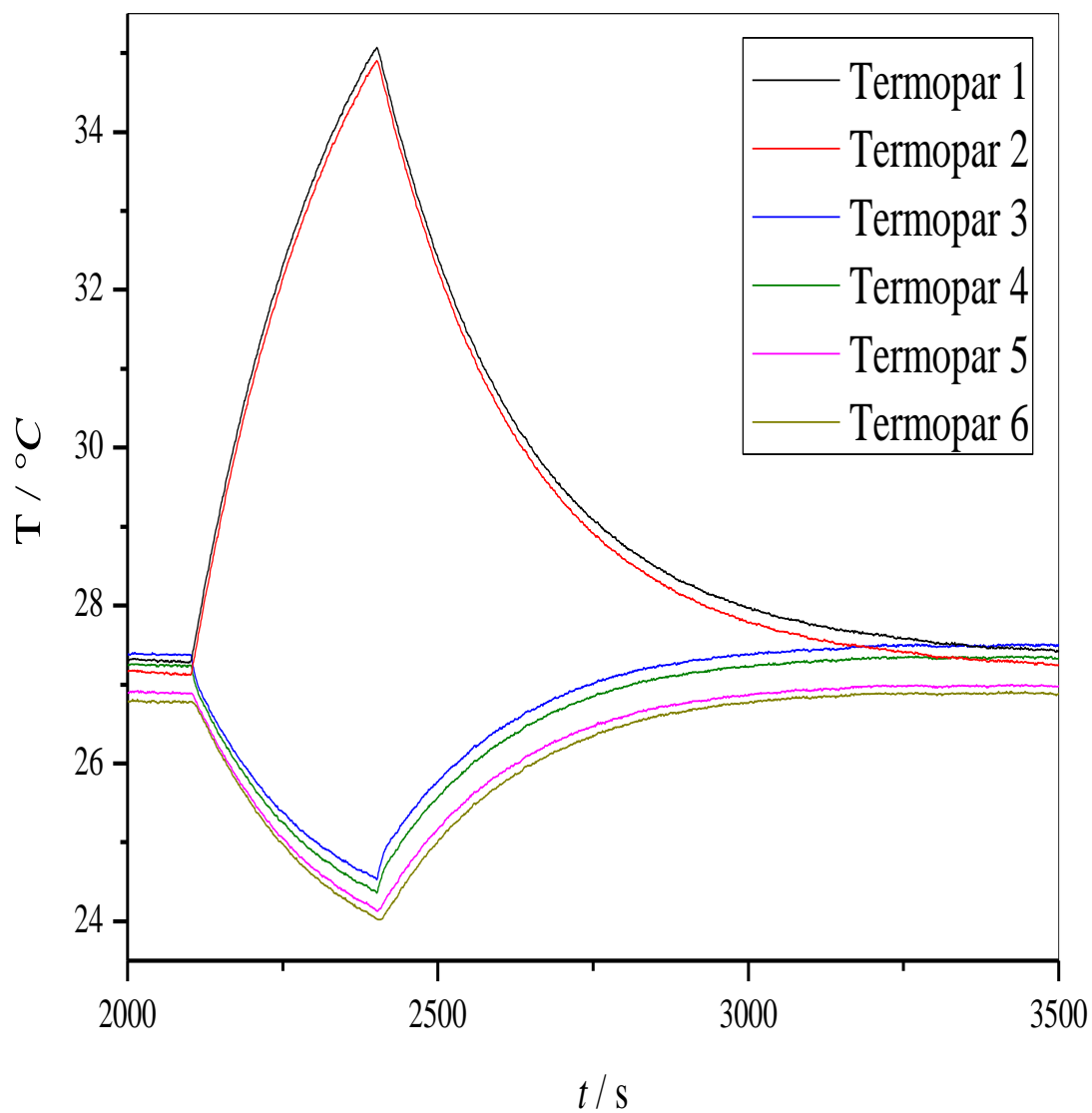
2) Metalni valjak debljine 20.0 mm bez termovodljive paste.



**Slika 24.** Prikaz promjene temperature metalnog valjka bez korištenja termovodljive paste na različitim udaljenostima od pobude Peltierovog elementa za električnu struju jakosti 0,5 A u trajanju od 5 min



**Slika 25.** Prikaz promjene temperature metalnog valjka s korištenjem termovodljive paste na različitim udaljenostima od pobude Peltierovog elementa za električnu struju jakosti 0,5 A u trajanju od 5 min



**Slika 26.** Prikaz promjene temperature metalnog valjka s korištenjem termovodljive paste na različitim udaljenostima od pobude Peltierovog elementa za električnu struju jakosti 0,5 A u trajanju od 5 min neposredno nakon mjerenje u istim uvjetima

**Tablica 5.** Usporedba vrijednosti vremenske konstante, maksimalne postignute temperaturne razlike uzrokovane pobudom i  $R^2$  za mjerenja na metalnom valjku debljine 20.0 mm sa i bez korištenja termovodljive paste

Uzorak debljine 20.0 mm s pastom				Uzorak debljine 20.0 mm bez paste					
	$\tau / s$	$\Delta T / ^\circ C$	$R^2$		$\tau / s$	$\Delta T / ^\circ C$	$R^2$	$\Delta\tau_{aps} / s$	$\Delta\tau_{rel} / \%$
Tp 1	224.54	7.78	0.99997	Tp 1	280.24	6.81	0.99996	55.70	19.88
Tp 2	221.54	7.79	0.99997	Tp 2	277.97	6.73	0.99997	56.43	20.30
Tp 3	223.82	2.83	0.99984	Tp 3	264.35	2.17	0.99980	40.53	15.33
Tp 4	239.34	2.86	0.99985	Tp 4	267.99	2.22	0.99981	28.65	10.69
Tp 5	244.01	2.76	0.99980	Tp 5	275.61	2.02	0.99972	31.60	11.47
Tp 6	241.34	2.73	0.99970	Tp 6	254.61	2.09	0.99966	13.27	5.21

**Tablica 6.** Ponovljivost rezultata mjerenja na metalnom valjku debljine 20.0 mm s korištenjem termovodljive paste

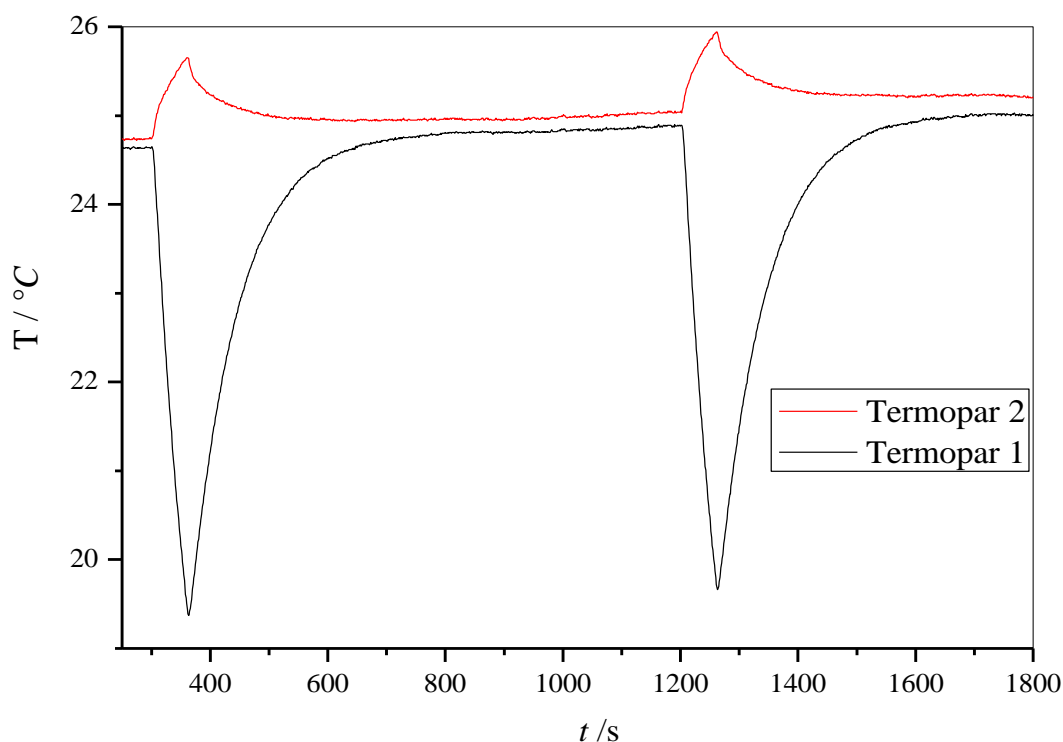
Uzorak debljine 20.0 mm s pastom ( 1 )				Uzorak debljine 20.0 mm s pastom ( 2 )					
	$\tau / s$	$\Delta T / ^\circ C$	$R^2$		$\tau / s$	$\Delta T / ^\circ C$	$R^2$	$\Delta\tau_{aps} / s$	$\Delta\tau_{rel} / \%$
Tp 1	224.54	7.78	0.99997	Tp 1	224.80	7.77	0.99997	0.26	0.12
Tp 2	221.54	7.79	0.99997	Tp 2	223.24	7.79	0.99997	1.70	0.76
Tp 3	223.82	2.83	0.99984	Tp 3	243.36	2.84	0.99983	19.54	8.03
Tp 4	239.34	2.86	0.99985	Tp 4	232.12	2.88	0.99986	7.22	3.11
Tp 5	244.01	2.76	0.99980	Tp 5	233.92	2.76	0.99980	10.09	4.31
Tp 6	241.34	2.73	0.99970	Tp 6	234.19	2.76	0.99974	7.15	3.05

### 3) Grijanje i hlađenje uzorka debljine 50 mm

Legenda ( Slika 8. ):

Termopar 1 – tp 1

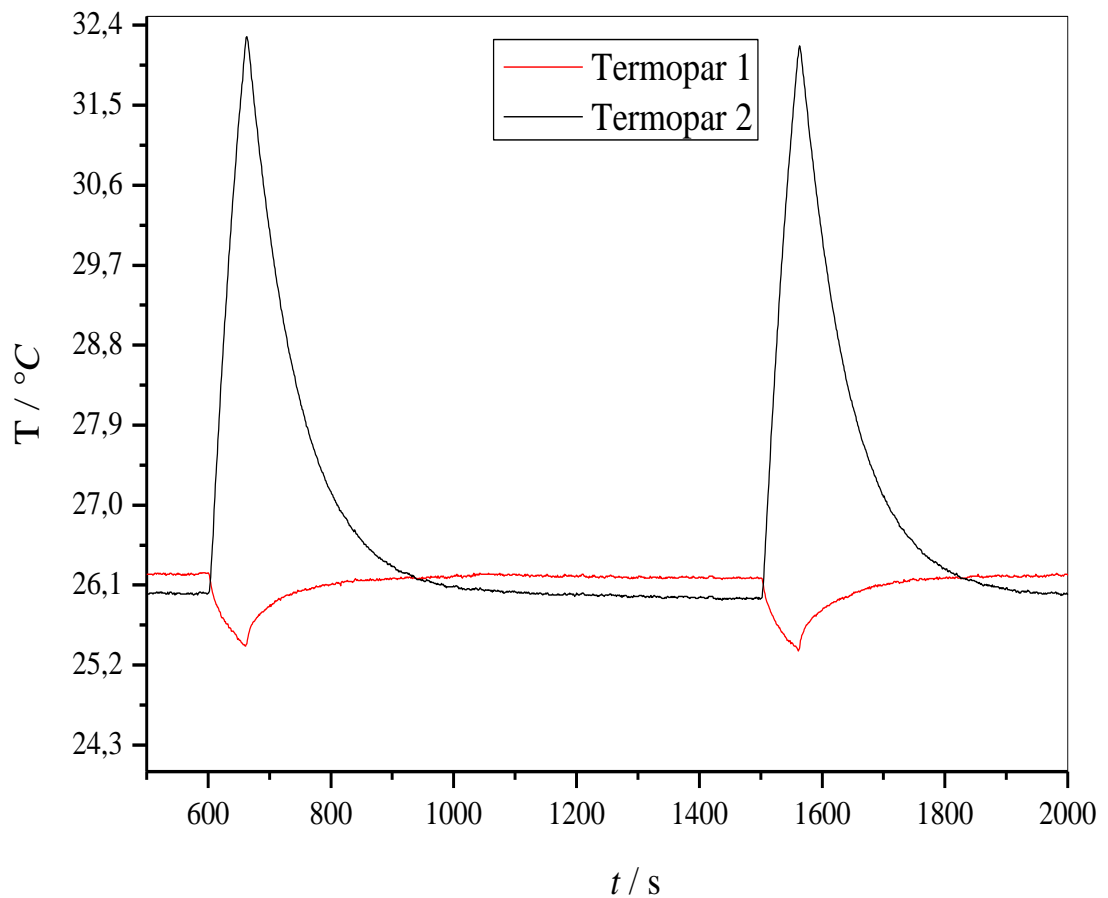
Termopar 2 – tp 2



**Slika 27.** Prikaz rezultata mjerenja ovisnosti temperature o vremenu u slučaju grijanja metalnog valjka debljine 50.0 mm i hlađenja metalnog valjka debljine 5.0 mm

**Tablica 7.** Usporedba vrijednosti vremenske konstante i  $R^2$  za mjerenja na procesu grijanja metalnog valjka debljine 50.0 mm i hlađenja metalnog valjka debljine 5.0 mm s korištenjem termovodljive paste

Uzorak debljine 350 mm					Uzorak debljine 50 mm ( 2 )				
	$\tau / s$	$R^2$	$\Delta\tau_{aps} / s$	$\Delta\tau_{rel} / \%$		$\tau / s$	$R^2$	$\Delta\tau_{aps} / s$	$\Delta\tau_{rel} / \%$
	29.77	0.99671	28.14	48.59	Tp 1 (1)	77.68	0.99992	5.31	6.40
	57.91	0.99596			Tp 1 (2)	82.99	0.99993		



**Slika 28.** Prikaz rezultata mjerenja ovisnosti temperature o vremenu u slučaju hlađenja metalnog valjka debljine 50.0 mm i grijanja metalnog valjka debljine 5.0 mm

**Tablica 8.** Usporedba vrijednosti vremenske konstante i  $R^2$  za mjerenja na procesu hlađenja metalnog valjka debljine 50.0 mm i grijanja metalnog valjka debljine 5.0 mm s korištenjem termovodljive paste

Uzorak debljine 350 mm					Uzorak debljine 50 mm ( 2 )				
	$\tau / s$	$R^2$	$\Delta\tau_{abs} / s$	$\Delta\tau_{rel} / \%$		$\tau / s$	$R^2$	$\Delta\tau_{abs} / s$	$\Delta\tau_{rel} / \%$
Tp 2 (1)	18.67	0.99506	73.89	79.83	Tp 1 (1)	81.55	0.99996	3.32	4.24
Tp 2 (2)	92.56	0.99499			Tp 1 (2)	78.23	0.99994		



#### D) Kvalitativno praćenje prijenosa topline kroz više slojeva materijala

Legenda ( Slika 9. ):

Termopar 1 – tp 1

Termopar 2 – tp 2

Termopar 3 – tp 3

Termopar 4 – tp 4

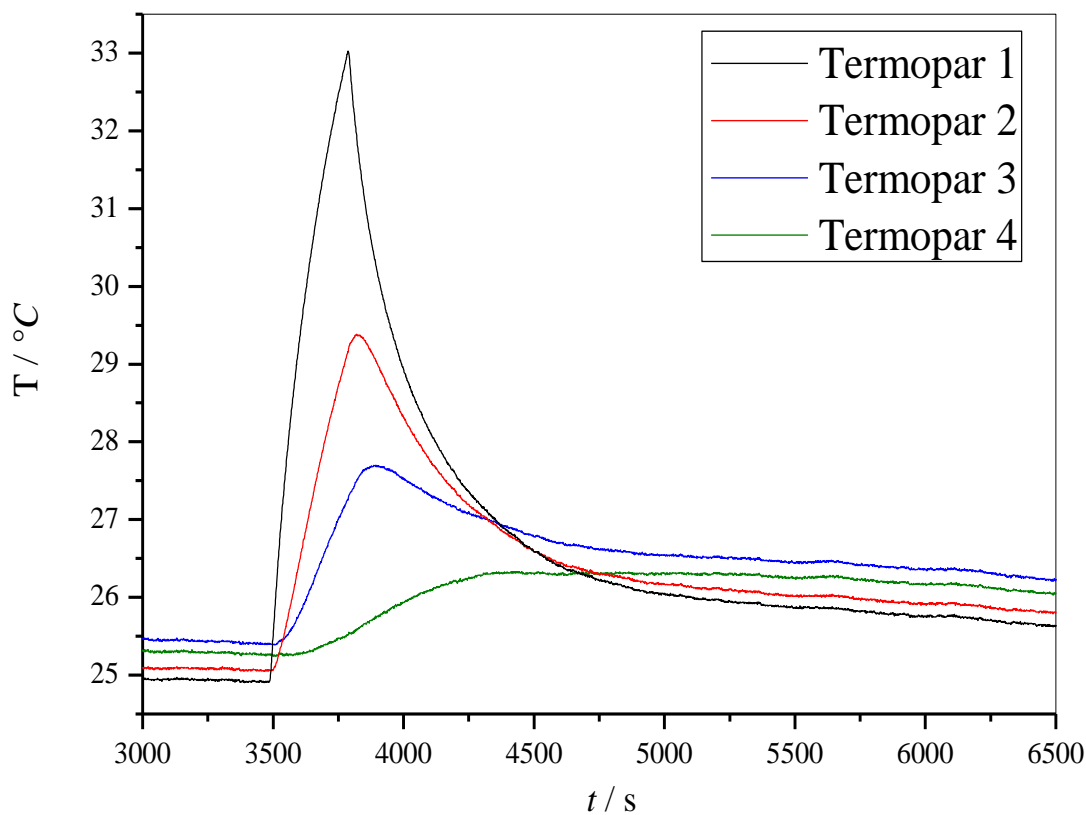
Peltierov element 1 – p 1

Peltierov element 2 – p 2

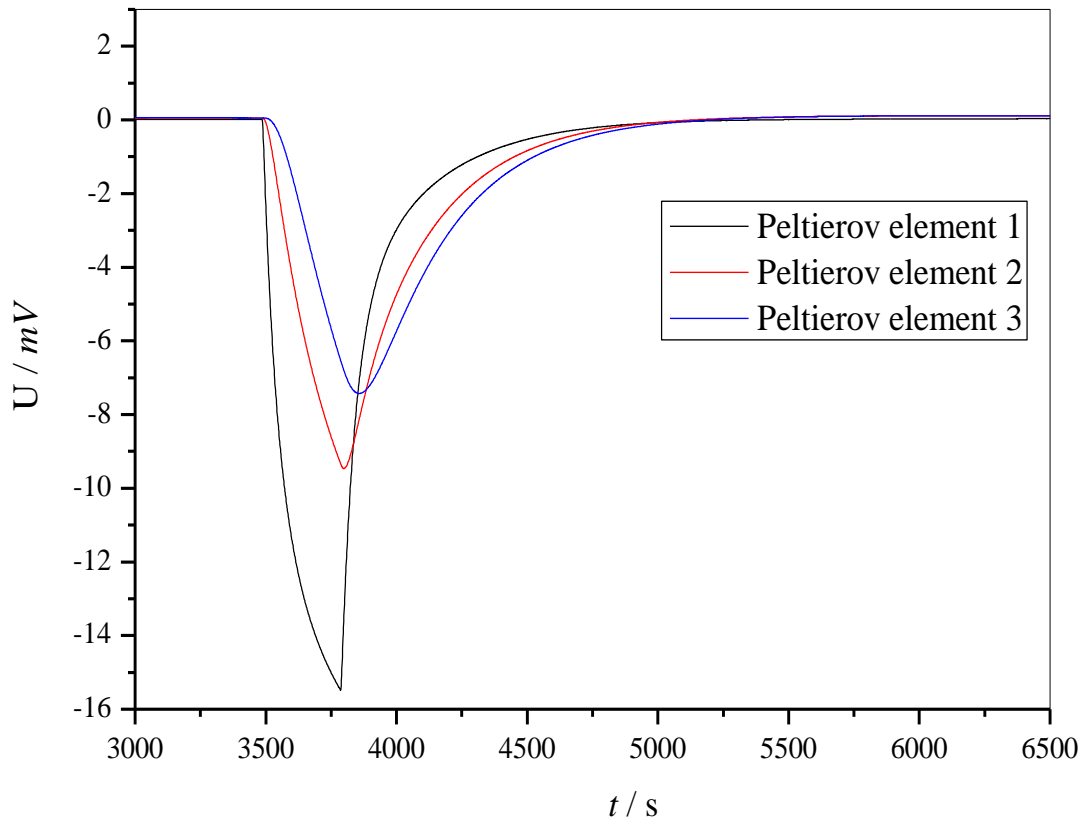
Peltierov element 3 – p 3

Kako bi se istražio nestacionarni prijenos topline kroz više slojeva različitog materijala (valjci od aluminijske legure i Peltierovi elementi), pripremljen je slog prema Legendi (Slika 9).

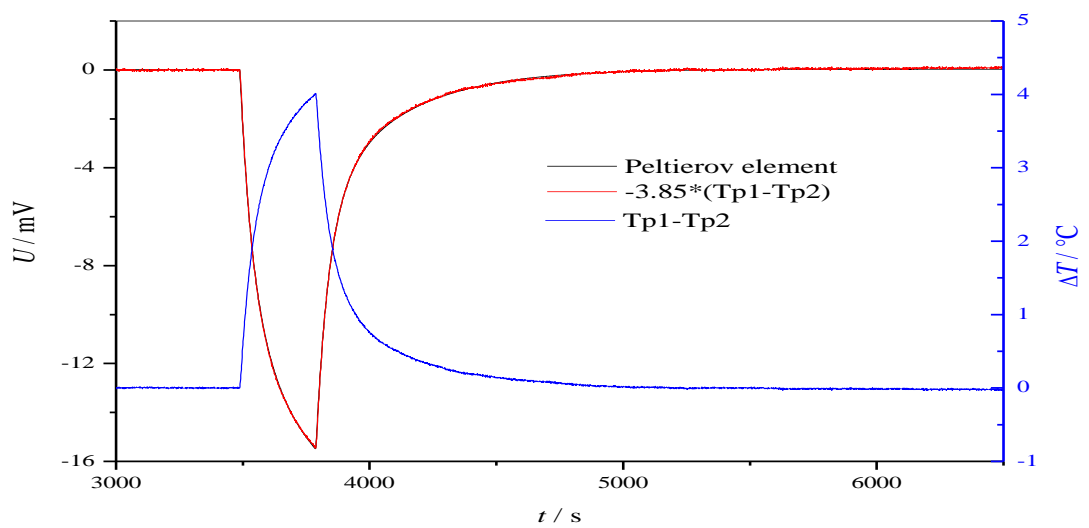
Temperatura svih dijelova sloga ujednačena je tijekom 3500 s, nakon čega je uključeno grijalo tijekom 300 s.



**Slika 29.** Prikaz promjene temperature u metalnim valjcima u ovisnosti o vremenu nakon uključivanja grijala



**Slika 30.** Prikaz promjene napona u Peltierovim elementima u ovisnosti o vremenu pobuđenog uključivanjem grijala

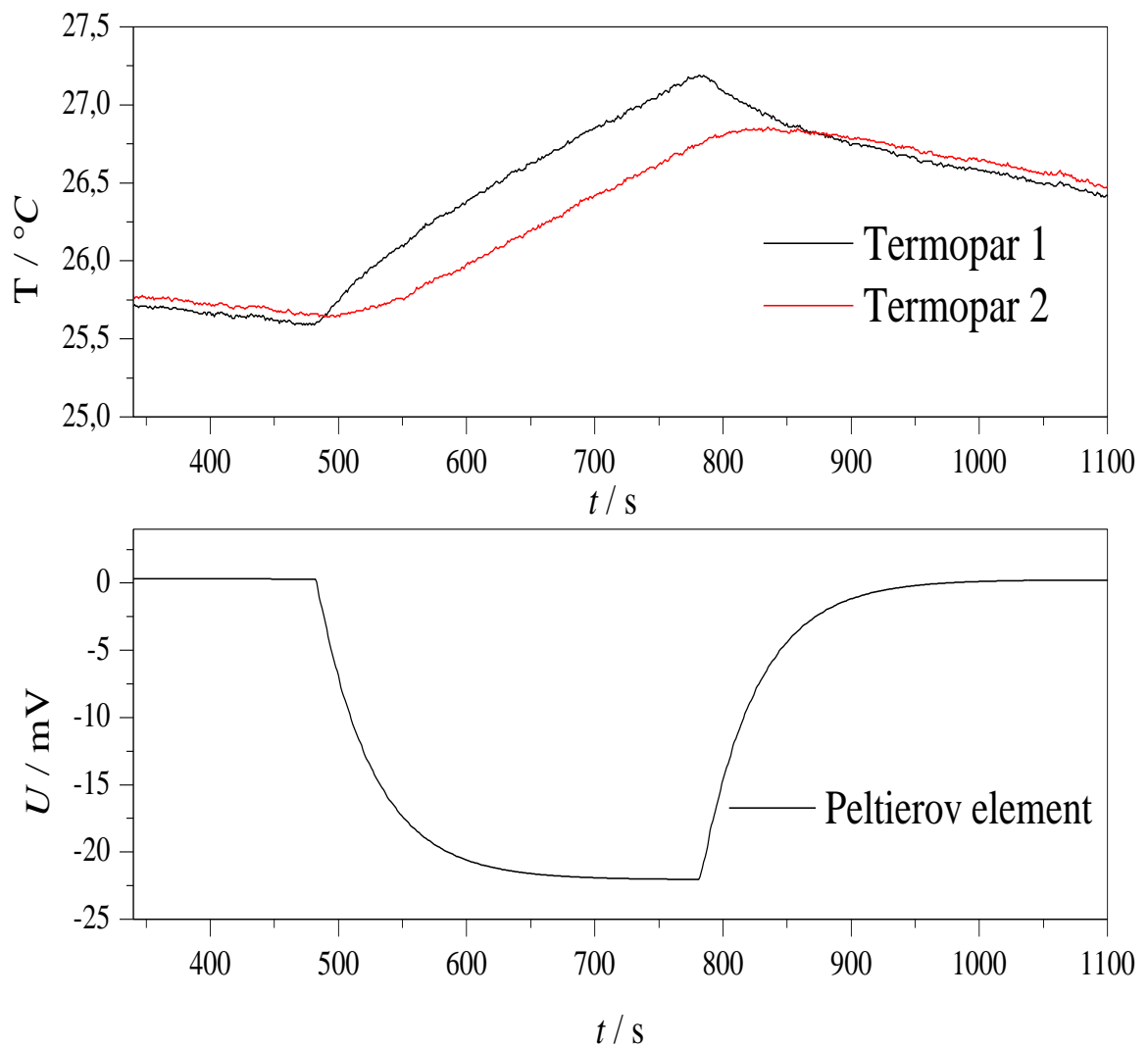


**Slika 31.** Ovisnost napona Peltierovog elementa između metalnih valjaka 1 i 2, sa pripadnom razlikom temperatura metalnih valjaka 1 i 2 (uz sliku 29 i 30).

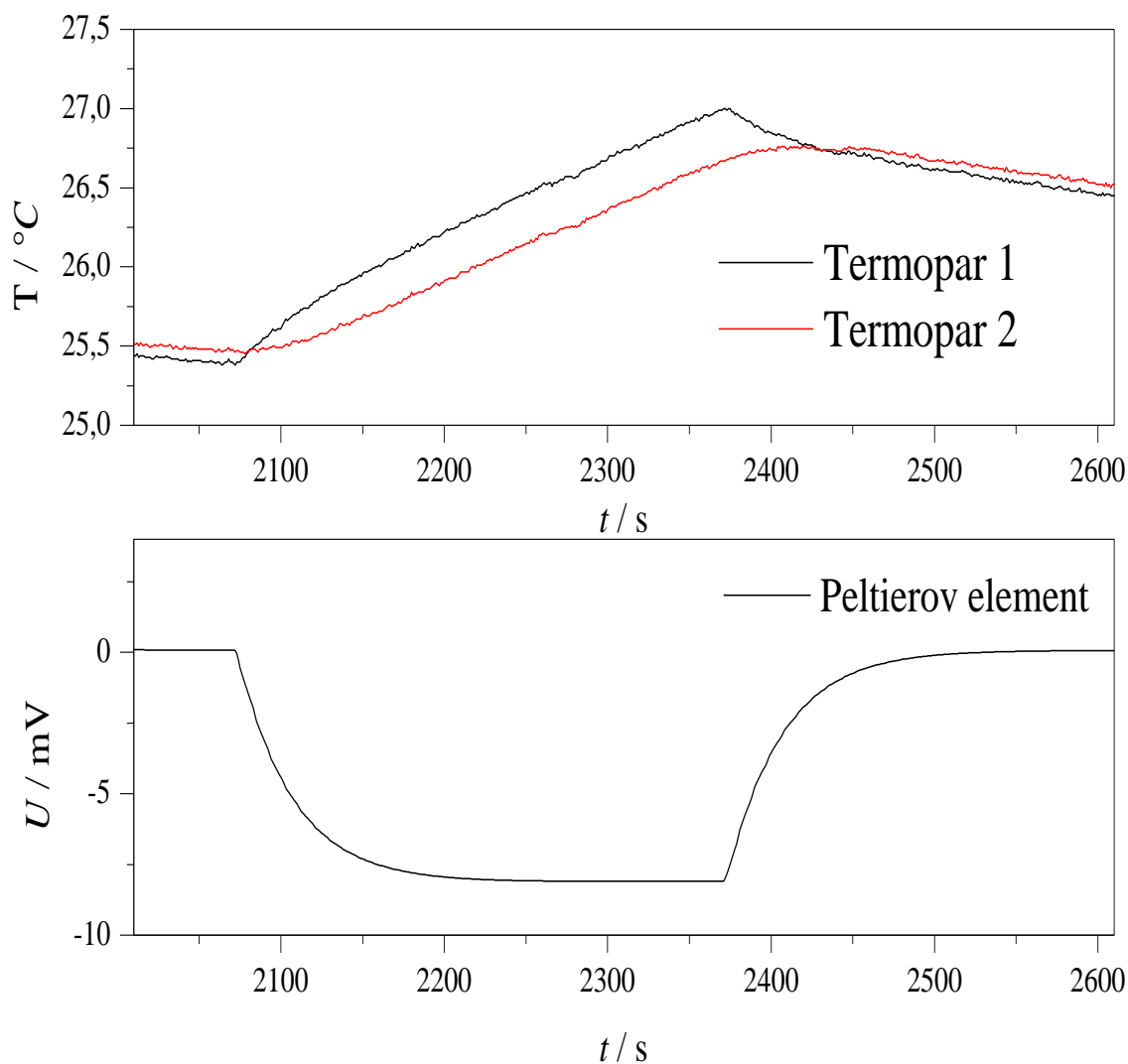
E) Provjera učinka trošila na prijenos topline kroz Peltierov element

Termopar 1 – tp 1

Termopar 2 – tp 2



**Slika 32.** Prikaz promjene temperature u metalnim valjcima te promjene napona pobuđenog u Peltierovom elementu u ovisnosti o vremenu nakon uključivanja grijala bez spojenog vanjskog trošila



**Slika 33.** Prikaz promjene temperature u metalnim valjcima te promjene napona pobuđenog u Peltierovom elementu u ovisnosti o vremenu nakon uključivanja grijala sa spojenim vanjskim trošilom

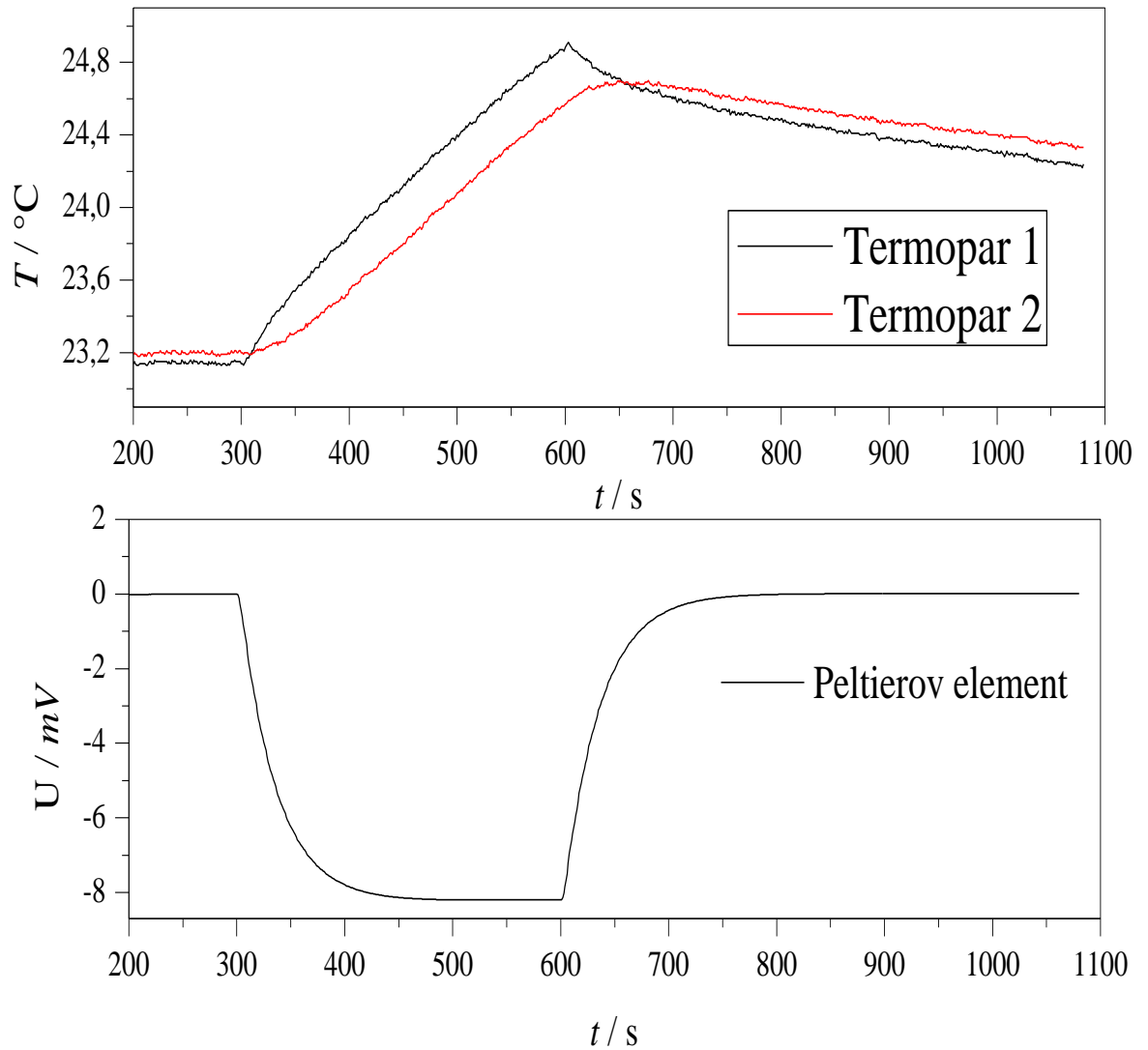
**Tablica 9.** Prikaz postignutih temperaturnih razlika na metalnim valjcima bez i sa spajanjem Peltierovog elementa na vanjsko trošilo

	Termopar 1	Termopar 2
$\Delta T_1$ - bez trošila	1.59	1.20
$\Delta T_2$ - s trošilom	1.60	1.28

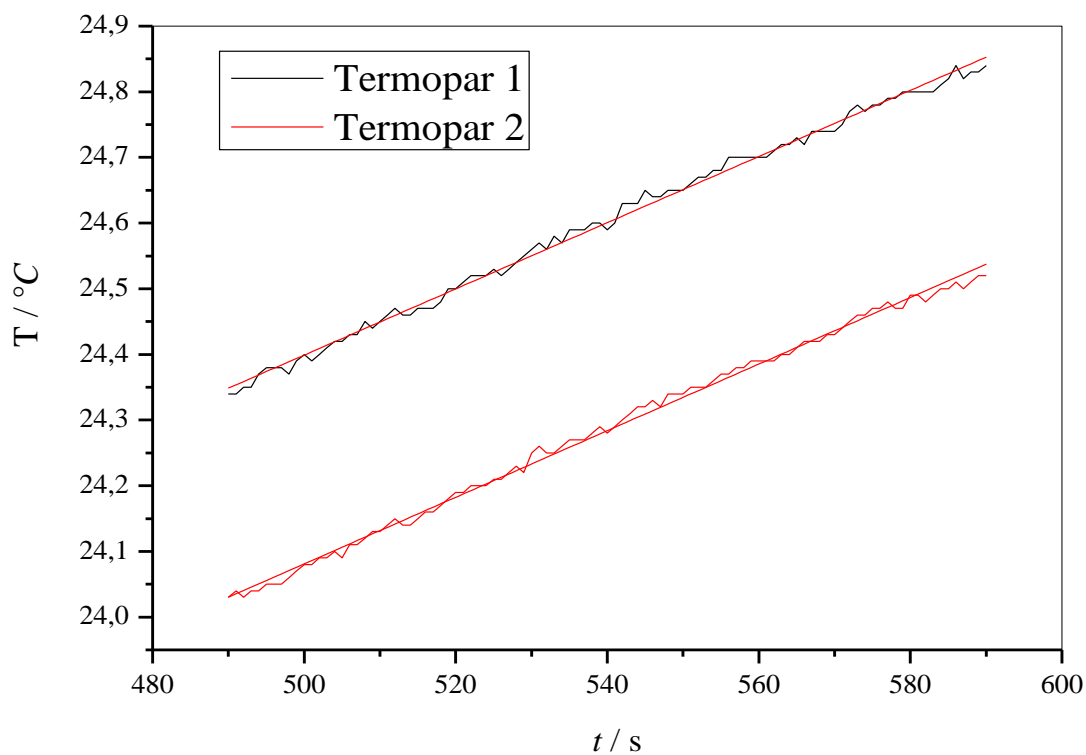
F) Procjena specifičnog toplinskog kapaciteta sustava i Peltierovog elementa

Termopar 1 – tp 1

Termopar 2 – tp 2



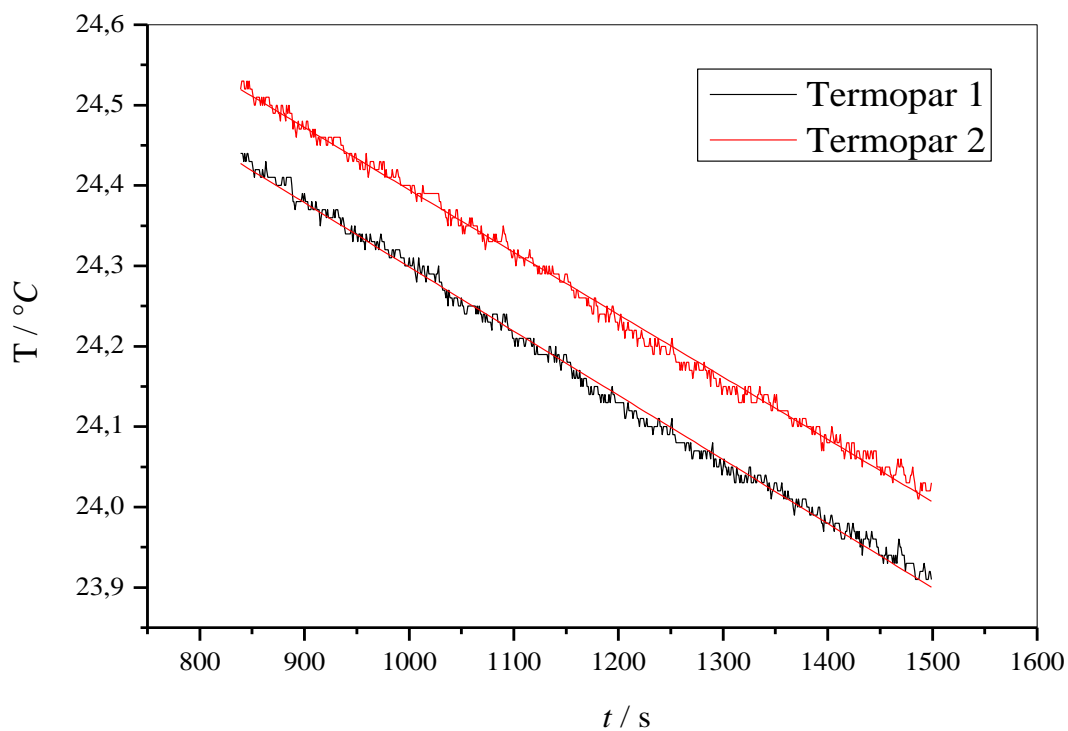
**Slika 34.** Prikaz promjene temperature u metalnim valjcima te promjene napona pobuđenog u Peltierovom elementu u ovisnosti o vremenu nakon uključivanja grijala sa spojenim vanjskim trošilom



**Slika 35.** Prikaz provedbe linearne regresijske analize u području konstantnog grijanja koji odgovara stabilnom naponu na Peltierovom elementu

**Tablica 10.** Podaci krivulje utočnjavanja linearnom regresijskom analizom za termopar 1 i termopar 2 u području konstantnog grijanja

Jednadžba	$y = a + bx$		
Termopar 1		Termopar 2	
$R^2$	0.99618	$R^2$	0.99667
Odsječak na y-osi	21.8789	Odsječak na y-osi	21.5450
Nagib	$5.04 \cdot 10^{-3} \pm 3.12 \cdot 10^{-5}$	Nagib	$5.07 \cdot 10^{-3} \pm 2.93 \cdot 10^{-5}$



**Slika 36.** Prikaz provedbe linearne regresijske analize na području konstantnog hlađenja radi korekcije gubitaka u okolinu

**Tablica 11.** Podaci krivulje utočnjavanja linearnom regresijskom analizom za termopar 1 i termopar 2 u području konstantnog hlađenja

Jednadžba	$y = a + bx$		
Termopar 1		Termopar 2	
$R^2$	0.99573	$R^2$	0.99581
Odsječak na y-osi	25,1707	Odsječak na y-osi	25,0971
Nagib	$-7.76 \cdot 10^{-4} \pm 1.98 \cdot 10^{-6}$	Nagib	$-7.98 \cdot 10^{-4} \pm 2.02 \cdot 10^{-6}$

## 5.) RASPRAVA

### B) Odabir osjetila temperature

Mjerenjem brzine odziva osjetila temperature te ispitivanjem praktičnosti korištenja, zaključeno je da tanji K-tip termopara puno pogodniji za ovaj eksperiment od debljeg. Kvalitativnim promatranjem brzine odziva osjetila na skokomičnu pobudu jasno se vidi da je tanji termopar ( Slika 14.) mnogo bolji od debljeg termopara ( Slika15.), zato što mu je mrtvo vrijeme znatno manje što kvantitativno potvrđuje Tablica 1. Mrtvo vrijeme tanjeg termopara iznosi svega 1 s, a debljeg čak 6 s.

Osim boljeg odziva, tanji termopar je bolji izbor za korištenje zbog praktičnih razloga. Mnogo ga je lakše staviti u rupu uzorka legure, namijenjenu za osjetila temperature, od debljeg termopara i nije ga potrebno dodatno fiksirati da se izbjegne njegovo ispadanje za razliku od debljeg termopara. Moguće je s velikom sigurnošću pretpostaviti točno mjesto kojemu se mjeri temperatura zato što se tanji termopar pozicionira u konusni kraj rupe kojeg je stvorio borer prilikom bušenja.

Mjerenjem odziva dva tanja termopara koja su bila smještena u istoj rupi uzorka legure pokazalo se da postoje razlike među njima što potiče sumnju u točnost i ponovljivost mjerenja, u jednakost mjernih osjetila i njihovu homogenost te samu izotermnost sustava. Ne može se odrediti koju je točku uzorka legure mjerio koji termopar, ali jasno su izražene razlike u izmjerenim temperaturama koje bi, u teoriji, trebale biti iste. Krivulje mjerenja prikazuje Slika 16. i one su podijeljene u tri dijela: period stabilizacije, period trajanja pobude i period prekida pobude. Računanjem srednjih vrijednosti razlika između izmjerenih vrijednosti temperature oba termopara za sva tri dijela, vidi se iz Tablice 2, da je ta razlika najizraženija u periodu trajanja pobude, a najmanja u periodu prekida pobude kada se uzorak vraća na početnu temperaturu.

### C) Provjeravanje učinka korištenja termovodljive paste

Provođenjem mjerenja ovisnosti temperature o vremenu na uzorcima legure različitih debljina korištenjem Peltierovog elementa kao izvora pobude temperaturne razlike, kvalitativno i kvantitativno se uočavaju brojne pogodnosti korištenja termovodljive paste za premazivanje kontaktnih površina. Mjerenja provedena bez korištenja termovodljive paste karakterizira izraženiji mjerni šum, veća razlika između izmjerenih temperatura pojedinih termoparova za vrijeme trajanja i završetka pobude, veće vrijednosti vremenskih konstanti procesa izjednačavanja temperature sustava nakon završetka pobude, manja postignuta temperaturna razlika uzrokovana pobudom te manja  $R^2$  vrijednost koja govori o slaganju mjernih podataka s računalno određenom funkcijom koja ih opisuje. Smanjenje vrijednosti vremenskih konstanta puno je izraženije na strani hlađenja, nego na strani grijanja kao i povećanje vrijednosti  $R^2$ . Između uzorka legure debljine 20.0 mm i 15.0 mm primjećuje se trend snižavanja vrijednosti vremenske konstante i povećanja maksimalne postignute temperaturne razlike od debljeg prema tanjem uzorku. Tanji uzorci imaju manju mogućnost raspodjele dovedene energije po svojem volumenu te se više nje lokalizirano akumulira što rezultira većim temperaturnim razlikama. Smanjenje vremenske konstante je rezultat bržeg postizanja termičke ravnoteže



sustava zbog veće postignute temperaturne razlike jer je ona pokretačka sila fenomenu prijenosa topline i to je veća što je temperaturni gradijent veći. Također, kod tanjih uzoraka legure, put prijenosa topline je kraći što također utječe na brzinu trajanja procesa.

Ponovljivost mjerenja je znatno veća u slučaju grijanja nego hlađenja. Odlučeno je za daljnja ispitivanja koristiti uzorke legure najmanjih debljina zbog praktičnosti, mogućnosti pretpostavke izotermnosti po cijeloj duljini puta prijenosa topline i najkraćim vremenskim konstantama što znatno skraćuje provedbu ispitivanja.

Drugi dio ovog dijela eksperimenta temeljio se na provjeri razlike između grijanja i hlađenja najtanjeg dostupnog uzorka legure. Grijanjem uzorka legure debljine 5.0 mm postignute su najveće vrijednosti  $R^2$  te je razlika u vrijednostima vremenske konstante uzastopnih mjerenja manja u slučaju grijanja.

#### D) Kvalitativno praćenje prijenosa topline kroz više slojeva materijala

Grijanjem višeslojnog sustava načinjenog od naizmjenice složenih uzoraka legure debljine 5.0 mm i Peltierovih elemenata, grafički se prikazuju tranzijenti topline u pojedinim točkama sustava. Termoparovima se mjeri ovisnost temperature o vremenu u uzorcima legure, a Peltierovi elementi mjere ovisnost generiranog napona usred temperaturnog gradijenta u ovisnosti o vremenu. Peltierovi elementi imaju veću osjetljivost od termoparova i time kvalitativno zornije prikazuju temperaturnu razliku gornje i donje dodirne površine s uzorcima legure.

Odziv temperature valjka aluminijske legure (termopar 1) u neposrednom doticaju sa grijalom je vrlo brz, a tijekom 300 s temperatura je porasla 8 °C. Porast temperature drugog, trećeg i četvrtog metalnog valjka je manji, a dolazi i do vidljivog kašnjenja odziva. Po isključenju grijala metalni valjak u doticaju sa grijalom se gotovo odmah počinje hladiti, dok drugi, treći i četvrti valjak pokazuju daljnji porast temperature kroz određeno vrijeme, pa tek nakon toga se vidljivo hlade. Temperatura sustava na kraju pobude je viša od početne temperature, te je u razdoblju od 5000-6500 s vidljivo polagano hlađenje tijekom kojeg dolazi do izjednačavanja temperature izoliranog prostora sa temperaturom laboratorija. Napon Peltierovog elementa proporcionalan je razlici temperatura metalnih valjaka između kojih se nalazi u dobrom toplinskom kontaktu (termovodljiva pasta).

Odziv temperature tankih (5.0 mm) metalnih valjaka moguće je tumačiti kao odziv složenog sustava sa više mjesta akumulacije topline. Takav je sustav općenito moguće modelirati sustavom od više običnih diferencijalnih jednadžbi sa konstantnim koeficijentima, gdje je svaka od jednadžbi zapravo bilanca topline pojedinog mjesta akumulacije. Budući da je akumulacija topline ( $dQ = m c_p dT$ ) jednaka razlici topline koja ulazi i izlazi iz sustava (zanemaren je član generacije topline), vrijedi:

$$dQ_i = m_i c_p \frac{dT_i}{dt} = hA(T_{i+1} - T_i) - hA(T_i - T_{i-1}) \quad (21)$$

Jednadžba (21) predstavlja sustav linearnih diferencijalnih jednadžbi kojima se opisuju linearni sustavi.

#### E) Provjera učinka trošila na prijenos topline kroz Peltierov element

Serijskim spajanjem Peltierovog elementa s vanjskim trošilom, odnosno otpornikom, želio se postići efekt „izbacivanja“ topline iz sustava u okolinu. Prilikom grijanja sustava i nastajanja temperaturnog gradijenta, Peltierov element generira određeni napon proporcionalan temperaturnoj razlici, te dolazi do toka električne struje unutar zatvorenog električnog strujnog kruga. S obzirom da je Seebeckov efekt reverzibilan, dovedena toplina troši se na generiranje električne struje koja teče vodičem do trošila u kojemu se pretvara u toplinu, točnije Jouleovu toplinu. Time bi trebalo biti moguće smanjiti temperaturne razlike postignute u sustavu, ali to se nije dogodilo. Krivulje ovisnosti temperature o vremenu prikazane na Slikama 32. i 33. su gotovo identične te Tablica 9. potvrđuje da nije nikakav učinak postignut. Povišenje temperature u slučaju korištenja vanjskog trošila može se pripisati netočnosti mjernih osjetila. Razlog smanjenju napona u slučaj korištenja trošila je taj što se mjerio na trošilu, a ukupni napon električnog strujnog kruga s više otpornika je suma napona na pojedinim otpornicima. Struja koju je Peltierov element generirao nije dovoljnog iznosa da bi se postigao značajan utjecaj „izbacivanja“ topline iz sustava pomoću Peltierovog elementa.

Moguće je da unutrašnji otpor Peltierovog elementa i otpor trošila nisu jednaki niti identičnih vrijednosti onima navedenima sa strane proizvođača što bi značilo da se nije postigla maksimalna moguća snaga na trošilu. Ovu mogućnost potvrđuje činjenica da napon, izmjeren na trošilu, ne iznosi točno  $\frac{1}{2}$  ukupnog napona otvorenog strujnog kruga izmjerenog na Peltierovom elementu.

#### F) Procjena specifičnog toplinskog kapaciteta sustava i Peltierovog elementa

Provođenjem mjerenja u jednakim uvjetima kao u prethodnom eksperimentu, računski je procijenjen specifični toplinski kapacitet cijelog sustava te Peltierovog elementa. Sustav, čija je masa izmjerena, sastoji se od dva uzorka legure, Peltierovog elementa i termovodljive paste. Provedbom linearne regresijske analize u periodu kada vrijedi:

$$\frac{dT}{dt} = konst. \quad (22)$$

koje je jednako naponskom platou na Peltierovom elementu, određena je srednja vrijednost promjene temperature s vremenom što je zapravo srednja vrijednost nagiba pravca oba termopara.

Provedena je korekcija za gubitke u okolinu tako da se na isti način odredila brzina promjena temperature s vremenom u periodu hlađenja na jednakom temperaturnom intervalu pri kojemu je određena promjena temperature s vremenom za vrijeme grijanja:

$$\frac{dT}{dt}(\text{idealno}) = \frac{dT}{dt}(\text{izmjereno}) - \frac{dT}{dt}(\text{gubitak}) \quad (23)$$

Procijenjeni specifični toplinski kapacitet sustava i Peltierovog elementa, izračunati koristeći se jednaždbom (7), iznose:

$$c_p(\text{sustav}) = 871,57 \text{ J/kgK}$$

$$c_p(\text{Peltierov element}) = 801,25 \text{ J/kgK}$$

## 6.) ZAKLJUČAK

Kvaliteta mjerenja uvelike ovisi o mjernim osjetilima i pretvornicima te je nužno postići najbolju izvedbu aparature za najviši stupanj točnosti i preciznosti.

Kontaktni otpor prijenosu topline nije zanemariv, stoga je nužno koristiti termovodljivu pastu za premazivanje kontaktnih površina. Potrebno je koristiti proizvode s navedenim svojstvima i precizno izvagati njihovu masu radi lakšeg opisa sustava.

Efekt „izbacivanja“ topline iz sustava pomoću Peltierovog elementa postoji, samo što on nije dovoljno izražen da bi postojala praktična mogućnost njegove primjene kao dodatni „aktivni“ izolacijski materijal u kalorimetrima. Količina električne struje koja se generira toplinskom pobudom u Peltierovom elementu nije dovoljno velikih iznosa da bi došlo do značajnog smanjenja grijanja/hlađenja sustava.

Dovoljno dugim grijanjem sustava, postiže se stanje stalne promjene temperature s vremenom. Pretpostavkom da se cijeli sustav nalazi na jednakoj temperaturi, poznavanjem snage grijača, mase pojedinih komponenti i specifičnih toplinskih kapaciteta svih komponenti, moguće je procijeniti vrijednost specifičnog toplinskog kapaciteta cijelog sustava te nepoznate komponente što je u ovom slučaju Peltierov element i iznosi 801 J/kgK.

Postoji mogućnost unaprjeđenja izvedbe aparature korištene u ovome radu poput dodatnog smanjenja utjecaja okoline dobrim termostatanjem i boljim izoliranjem, zatim uporabe mjernih osjetila čija se svojstva ne razlikuju, boljim pozicioniranjem i fiksiranjem osjetila temperature radi veće sigurnosti tijekom mjerenja temperature uzorka, te boljom izvedbom grijala.

## 7.) POPIS SIMBOLA

$A$ , površina, [ m<sup>2</sup> ]

$a$ , toplinska difuzivnost, [ m<sup>2</sup>/s ]

$\alpha$ , koeficijent prijelaza topline [ W/m<sup>2</sup>K ]

$c_p$ , specifični toplinski kapacitet, [ J/kgK ]

$E$ , energija, [ J ]

$I$ , električna struja, [ A ]

$K$ , koeficijent prolaza topline, [ W/m<sup>2</sup>K ]

$m$ , masa, [ kg ]

$P$ , snaga, [ W ]

$Q$ , toplina, [ J ]

$q$ , gustoća toplinskog toka ili toplinski fluks, [ W/m<sup>2</sup> ]

$R$ , električni otpor, [  $\Omega$  ]

$S_{AB}$ , Seebeckov koeficijent, [ mV/K ]

$T$ , termodinamička temperatura, [ K ]

$t$ , vrijeme, [ s ]

$U$ , električni napon, [ V ]

$\Theta$ , mrtvo vrijeme, [ s ]

$\lambda$ , koeficijent toplinske vodjivosti, [ W/mK ]

$\tau$ , vremenska konstanta, [ s ]

$\pi_{AB}$ , Peltierov koeficijent, [ J/A ]

$\rho$ , gustoća, [ kg/K ]

$\tau$ , Thomsonov koeficijent, [ Jm/AK ]

## 8.) LITERATURA

- [1] Kulišić, P., Mehanika i toplina, IX. izdanje, Školska knjiga, Zagreb, 2005.
- [2] Temperatura, Hrvatska enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, [www.enciklopedija.hr](http://www.enciklopedija.hr), (pristupio 20. travnja 2019.)
- [3] Termodinamika, Hrvatska enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, [www.enciklopedija.hr](http://www.enciklopedija.hr), (pristupio 20. travnja 2019.)
- [4] Bolf, N., Mjerenje i vođenje procesa, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, 2017.
- [5] Atkins, P., de Paula, J., Physical Chemistry, 8th edition, WH Freeman, 2006.
- [6] Zakon očuvanja energije, Hrvatska enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, [www.enciklopedija.hr](http://www.enciklopedija.hr), (pristupio 20. travnja 2019.)
- [7] Cengel, A. Y., Boles, A. M., Thermodynamics: An Engineering Approach, 5th edition, McGraw Hill, 2006.
- [8] Incropera, F.P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 6th edition, John Wiley & Sons
- [9] Glasnović, A., Sander, A., Prijenos tvari i energije, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije
- [10] Fonon, Hrvatska enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=20072> (pristupio 24. svibnja 2019.)
- [11] Pitts, D. R., Sissom, L. E., Shaum's Outline of Theory and Problems of Heat Transfer, 2nd Edition, McGraw-Hill Education, 1998.
- [12] Specifični toplinski kapacitet, Hrvatska enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=70165>(pristupio 24. svibnja 2019.)
- [13] Lee, H.S., Thermoelectrics: Design and Materials, John Wileys & Sons, Ltd., 2016.
- [14] Ioffe, A. F., Semiconductor Thermoelements and Thermoelectric Cooling, Infosearch Limited London
- [15] Pinter, V., Osnove elektrotehnike: knjiga prva, ITP „Tehnička knjiga“ d.d. – Zagreb, 1994.
- [16] Snaga, Hrvatska enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=56867> (pristupio 24. svibnja 2019.)
- [17] Prilagođenje za maksimalnu snagu, Osnove elektrotehnike, Fakultet elektrotehnike i računarstva, [https://osnove.tel.fer.hr/VJEZBEOE/DC\\_10.htm?x=92](https://osnove.tel.fer.hr/VJEZBEOE/DC_10.htm?x=92) (pristupio 26. svibnja 2019.)
- [18] <http://www.pathways.cu.edu.eg/ec/text-pdf/part%20c-17.pdf> (pristupio 27. svibnja 2019.)



## 10.) PRILOG



