

# Automatsko mjerenje temperature u vertikalnim konfiguracijama termoelektričnih modula

---

**Pažur, Antonio**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Organization and Informatics / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet organizacije i informatike**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:211:919323>

*Rights / Prava:* [Attribution-ShareAlike 3.0 Unported/Imenovanje-Dijeli pod istim uvjetima 3.0](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-15**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Organization and Informatics - Digital Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ORGANIZACIJE I INFORMATIKE  
V A R A Ž D I N**

**Antonio Pažur**

**Automatsko mjerenje temperature u  
vertikalnim konfiguracijama  
termoelektričnih modula**

**ZAVRŠNI RAD**

**Varaždin, 2021.**

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET ORGANIZACIJE I INFORMATIKE  
V A R A Ž D I N**

**Antonio Pažur**

**Matični broj: 0016136299**

**Studij: Informacijski sustavi**

**Automatsko mjerenje temperature u vertikalnim konfiguracijama  
termoelektričnih modula**

**ZAVRŠNI RAD**

**Mentor:**

Doc. dr. sc. Tomaš Boris

**Varaždin, rujan 2021.**

*Antonio Pažur*

### **Izjava o izvornosti**

Izjavljujem da je moj završni rad izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onima koji su u njemu navedeni. Za izradu rada su korištene etički prikladne i prihvatljive metode i tehnike rada.

*Autor potvrdio prihvaćanjem odredbi u sustavu FOI-radovi*

---

## Sažetak

Tema ovoga završnog rada je upotreba termoelektričnih modula koristeći poseban sustav preko kojega će se regulirati napon te samim time i izlazna temperatura termoelektričnih modula. Cilj je tri modula spojiti u vertikalnu konfiguraciju i pomoću sustava za upravljanje modulima pronaći odgovarajući napon kojim će se postići željena niska temperatura vertikalne konfiguracije. Naime termoelektrični moduli imaju mnogo prednosti. Nemaju pokretnih dijelova, vrlo su pouzdani, ne stvaraju buku ni električni šum, manji su i lakši od klasičnih mehaničkih sustava hlađenja/grijanja te prilikom svojeg rada ne koriste nikakve štetne kemikalije ili plinove. S druge strane, najveća mana im je isplativost. Zbog principa rada koji jednu stranu modula čini hladnom, a drugu vrućom, dolazi do velikih gubitaka energije jer se u većini slučajeva efikasno koristi samo jedna strana termoelektričnog modula, dok druga biva neiskoristiva. Zajedno sa modulom potrebno je koristiti i prikladan hladnjak koji će vruću stranu modula konstantno hladiti kako ne bi došlo do oštećenja modula, što također smanjuje njegovu isplativost. Korištenje termoelektričnih modula je svestrano i svakodnevno, a najčešće se koriste u područjima manjih snaga uz mogućnost vrlo precizne regulacije temperature.

**Ključne riječi:** termoelektrični moduli, sustav za mjerenje temperature, prijenos topline, Peltier, termoelektrični efekt

# Sadržaj

Sadržaj .....	iii
1. Uvod .....	1
1.1. Opis zadatka završnoga rada .....	2
1.2. Struktura završnoga rada .....	2
2. Prijenos topline .....	3
2.1. Kondukcija .....	3
2.2. Konvekcija .....	3
2.3. Radijacija .....	4
3. Termoelektrični koncept .....	5
3.1. Seebeckov efekt .....	5
3.2. Peltierov efekt .....	6
3.3. Thomsonov efekt .....	6
4. Termoelektrični modul .....	7
4.1. Komponente .....	7
4.2. Karakteristike .....	8
4.3. Princip rada .....	8
5. Sustav za upravljanje termoelektričnih modula .....	9
5.1. Korištene aplikacije i alati .....	9
5.2. Izrada sustava .....	11
5.2.1. Arduino IDE .....	12
5.2.2. Keysight Connection Expert .....	17
5.2.3. Keysight BenchVue .....	19
5.3. Testiranje sustava .....	24
5.3.1. Simulacija 1 .....	24
5.3.2. Simulacija 2 .....	25
5.4. Usporedba rezultata .....	28
6. Usporedba s tradicionalnim sustavima hlađenja .....	29
6.1. Prednosti .....	29
6.2. Nedostaci .....	29
7. Uporaba termoelektričnih modula .....	30
8. Zaključak .....	31
Popis literature .....	32
Popis slika .....	34
Popis tablica .....	35



# 1. Uvod

Jedna od osnovnih fizikalnih veličina jest temperatura. Ona opisuje sposobnost izmjene topline nekog tijela ili tvari sa okolinom. Kroz povijest, ljudi su na bezbroj načina, od primitivnih pa sve do sofisticiranih i modernih metoda, pokušavali umjetno utjecati na temperaturu nekog tijela ili tvari kako bi ih prilagodili svojim potrebama.

Izumom vatre, shvaćeno je kako se sagorijevanjem određenih tvari, toplina može prenijeti na okolinu ili pak neku drugu tvar. No toplina se ne prenosi samo kako bi se neka druga tvar ili tijelo zagrijalo. Osim zagrijavanja, u našim životima je vrlo važan efekt hlađenja, koji zapravo nije ništa drugo nego odvođenje topline sa objekta kojega želimo rashladiti.

Pojam umjetnog hlađenja dolazi do izražaja 1756. godine kada je William Cullen izumio prvi uređaj za umjetno hlađenje („Refrigeration invention“, bez dat.). Iako interes tada nije bio velik, danas je umjetno hlađenje neizostavan dio svakodnevnice. Prisutan je gotovo u svim aspektima naših života, a da toga nismo niti svjesni.

Modernim dobom došlo je i do potrebe mnogo složenijih načina hlađenja, gdje je najbitnija brza i precizna regulacija željene izlazne temperature. Kako bi se odgovorilo na nove potrebe čovječanstva, izumljeni su takozvani termoelektrični moduli.



## **1.1. Opis zadatka završnoga rada**

Tema ovoga završnog rada je upotreba termoelektričnih modula koristeći poseban sustav preko kojega će se regulirati napon za svaki pojedini modul kako bi se dobila željena izlazna temperatura na hladnoj strani gornjega modula. Cilj je tri modula spojiti u vertikalnu konfiguraciju, odnosno postaviti module jedan na drugoga. Time se želi postići da donji modul hladi zagrijanu stranu modula iznad sebe. Pomoću sustava za upravljanje napajanjima, modulima će se pustiti određeni napon kako bi se postigla željena izlazna temperatura. Rezultati će se tada prikazati u grafičkome i tabličnome obliku te će se međusobno usporediti dvije simulacije sustava u kojima će se konfigurirati različiti izlazni naponi prema modulima.

## **1.2. Struktura završnoga rada**

U uvodnom dijelu završnoga rada opisana je povijesna važnost shvaćanja koncepata usko vezanih uz temperaturu te prijenos topline. Opisan je zadatak rada te je objašnjeno na koji način funkcionira prijenos topline te koji su sve načini, ali i uvjeti odvijanja prijenosa. Nakon što se objasne svi potrebni koncepti za shvaćanje pojma topline, opisana su tri najvažnija termoelektrična koncepta na kojima počiva ideja termoelektričnih modula. Nakon opisa što su to termoelektrični moduli, slijedi praktični dio završnoga rada, odnosno zadatak opisan u prijašnjem poglavlju. U okviru zadatka, evidentirani su svi potrebni podaci kako bi se mogao dati ispravan i kompletan zaključak te usporedba između termoelektričnih modula i klasičnih, tradicionalnih sustava za prijenos topline.

## 2. Prijenos topline

Toplina spada u kategoriju vrste energije. Tu vrstu energije posjeduju sva tijela, tvari i fluidi, a ona je usko povezana sa načinom na koji se atomi, molekule i druge čestice unutar toga tijela gibaju. Do zagrijavanja ili hlađenja, odnosno prijenosa topline dolazi između dva tijela ukoliko se oni nalaze na različitim temperaturama. Sam prijenos topline odvija se iz smjera tijela više temperature prema tijelu niže temperature s obzirom da tijelo više temperature posjeduje veću količinu energije. Također je bitno za naglasiti da što je temperaturna razlika veća, to se prijenos topline brže odvija (Galović, 2014, str. 50).

Postoje tri osnovna mehanizma prijenosa topline, a to su prijenos topline konvekcijom, kondukcijom i zračenjem („Prijenos topline“, bez dat.).

### 2.1. Kondukcija

Prvi način prijenosa topline naziva se kondukcija ili provođenje. Kod te vrste prijenosa topline, dio tijela se zagrijava izravnim dodirnom sa izvorom topline pa je ovdje zapravo riječ o provođenju topline koje je svojstveno čvrstim tvarima, odnosno krutinama. Toplina se prenosi u obliku kinetičke energije između molekula tijela i izvora topline. Upravo ta kinetička energija zapravo govori o brzini kojom se molekule kreću. Ako je temperatura viša, molekule se brže kreću. Prilikom dodira dvaju tijela različitih temperatura, dolazi do temperaturnog izjednačavanja. To se vrši na način da se molekule koje se kreću većom brzinom jer su na toplijem tijelu, sudaraju sa sporijim molekulama hladnijeg tijela. Time se brže molekule usporavaju te se sama temperatura toplijeg tijela smanjuje, dok se temperatura hladnijeg tijela povećava zajedno sa brzinom sporijih molekula („Prijenos topline – Kondukcija topline“, bez dat.).

### 2.2. Konvekcija

Drugi način prijenosa topline karakterističan je za fluide u gibanju i naziva se konvekcija. Do prijenosa topline dolazi zbog gibanja toplih, odnosno hladnih dijelova fluida između područja različitih temperatura. Molekularno gledano, taj proces se odvija u takozvanoj struji materijalnih čestica u kojoj je narušena toplinska ravnoteža. Sam proces može biti aktiviran na dva načina. Prvi način aktivira gibanje molekula fluida zbog lokalne razlike

gustoće, dok se drugi način ostvaruje kao posljedica utjecaja neke vanjske sile („Hrvatska enciklopedija, konvekcija“, bez dat.).

Prvi način je posljedica prirodnog karaktera, a prisutan je kod temperaturne razlike u okolini jer se time mijenja i sama gustoća fluida. To aktivira spontano, odnosno slobodno i prirodno skakanje molekula fluida. Sa druge strane, konvekcija može biti i prisilna, odnosno nametnuta. Tada se gibanje molekula uzrokuje primjenom raznih uređaja poput toplinske pumpe ili recimo ventilatora. Kod prisilne konvekcije, prijenos topline je intenzivniji nego pri prirodnoj konvekciji jer se tada aktivira gibanje većeg broja molekularnih čestica što automatski dovodi i do većeg broja sudara između čestica.

## 2.3. Radijacija

Za razliku od prijašnjih načina prijenosa topline, kod ove vrste prijenosa koristi se elektromagnetsko zračenje. Atomi i molekule sastavljeni od nabijenih čestica svojim gibanjem stvaraju elektromagnetsko zračenje i na taj način odvođuju energiju, odnosno toplinu od zagrijanog tijela. Sljedeća bitna razlika u odnosu na prva dva načina je ta da zračenje kao princip prijenosa topline direktno ovisi o temperaturi, dok je kod konvekcije i kondukcije bitna samo temperaturna razlika između tijela koje vrše prijenos topline („Prijenos topline“, bez dat.).

Zanimljivo je što tijelo na koje je usmjereno elektromagnetsko zračenje ne mora nužno biti pod utjecajem tog zračenja. Tijelo tako može toplinsko zračenje apsorbirati, reflektirati ili čak propustiti. Kako bi došlo do zagrijavanja tijela, ono mora apsorbirati toplinsko zračenje. Najočitiiji primjer je između Sunca i Zemlje gdje planet Zemlja dio zračenja poslanog od strane Sunca apsorbira, a dio reflektira i na taj način održava temperaturu pogodnu za život (R. Siegel, i J. Howel, 2002, str. 2).

Također, kod radijacije, boja tijela predstavlja jedan od faktora zagrijavanja tijela na koje utječe toplinsko zračenje. Kako je riječ o elektromagnetskom zračenju, ono drugačije utječe na svaku pojedinu boju, odnosno na valnu duljinu elektromagnetskog spektra. Materijal crne boje se tako brže zagrijava s obzirom da crna boja predstavlja odsustvo svjetla i time apsorbira sve vidljive valne duljine elektromagnetskog spektra.

## 3. Termoelektrični koncept

Termoelektrični koncept, odnosno efekt govori o međusobnoj ovisnosti temperaturne razlike na krajevima vodiča i poluvodiča s obzirom na električni napon. Uređaji koji rade na principu termoelektričnog efekta služe kao generatori struje, toplinski senzori i/ili imaju mogućnost dovođenja, odnosno odvođenja topline sa nekog tijela (I. Šumiga, M. Grđan, J. Huđek, 2007).

Postoje zapravo tri različita efekta koja zajedno čine termoelektrični efekt, a nazive su dobili po svojim pronalazačima:

- 1) temperaturna razlika dovodi do stvaranja električne energije (Seebeck)
- 2) električna energija dovodi do procesa hlađenja/zagrijavanja (Peltier)
- 3) sveobuhvatno objašnjenje termoelektričnog efekta (Thomson).

### 3.1. Seebeckov efekt

Seebeckov efekt opisuje pojavu električne energije ukoliko se na krajevima različitih, ali međusobno spojenih vodiča/poluvodiča osjeti temperaturna razlika. Napon koji se tada javlja još se i naziva Seebeckova elektromotorna sila, a ovisnost između te sile i temperaturne razlike iskazana je Seebeckovim koeficijentom (I. Šumiga, M. Grđan, J. Huđek, 2007).

Talijanski znanstvenik, Alessandro Volta, prvi je puta opisao ovaj efekt 1794. godine. Efekt je ipak naziv dobio po njemačkome fizičaru Thomasu Johann Seebeck koji je taj efekt samostalno otkrio i detaljnije opisao. Do otkrića je došao jednostavnim pokusom kada je primijetio čudno ponašanje igle na kompasu. Naime, u zatvorenom krugu, kompas je bio spojen sa dvjema različitim žicama koje su na krajevima postizale temperaturnu razliku. Efekt je proizveo električnu struju, a samim time i elektromagnetsko polje koje je tada utjecalo na neobičan rad kompasa. Kako Seebeck tada nije shvatio da je riječ o pojavljivanju električne energije, on je taj fenomen nazvao *termomagnetskim efektom* jer je bio siguran da je prouzročio magnetsku promjenu utjecajem razlike u temperaturi. Kasnije je tu pogrešku ispravio danski fizičar Hans Christian Oersted koji je tada prvi spomenuo i opisao izraz termoelektričnosti („Thermoelectric effect“, bez dat.).

## 3.2. Peltierov efekt

1834. godine, francuski fizičar Jean Charles Athanase Peltier opisao je efekt suprotan Seebeckovom efektu. Kako Seebeck govori o postizanju električne energije zbog temperaturne razlike, tako Peltier opisuje nastanak temperaturne razlike na krajevima vodiča ukoliko se kroz njih pusti električna struja. Tako se na spojevima različitih vodiča omogućava da se neko tijelo zagrije ili pak ohladi, ovisno o toku struje i spoju vodiča („Thermoelectric effect“, bez dat.).

Peltierov efekt se može smatrati povratnom akcijom Seebeckovom efektu. Upravo zbog te pojave, Peltierov efekt se koristi kod termoelektričnih toplinskih pumpi, ali i kod termoelektričnih rashladnih uređaja („Seebeckov efekt“, bez dat.)

## 3.3. Thomsonov efekt

Ovisno o vrsti materijala kroz koje teče struja, Seebeckov koeficijent nije stalan u odnosu na temperaturu. Kako je Peltierov efekt suprotan Seebeckovom, na njega također utječe ova pojava. Detaljnije je to opisao Wiliam Thompson 1851. godine, poznatiji kao Lord Kelvin. Nakon što je detaljno proučio teze iznesene od strane Seebecka i Peltiera, donio je konačni matematički izračun za termoelektrični efekt („Peltier“, bez dat.)

Time je opisao hlađenje, odnosno grijanje vodiča kroz koji teče struja u ovisnosti na temperaturni gradijent (I. Šumiga, M. Grđan, J. Huđek, 2007).

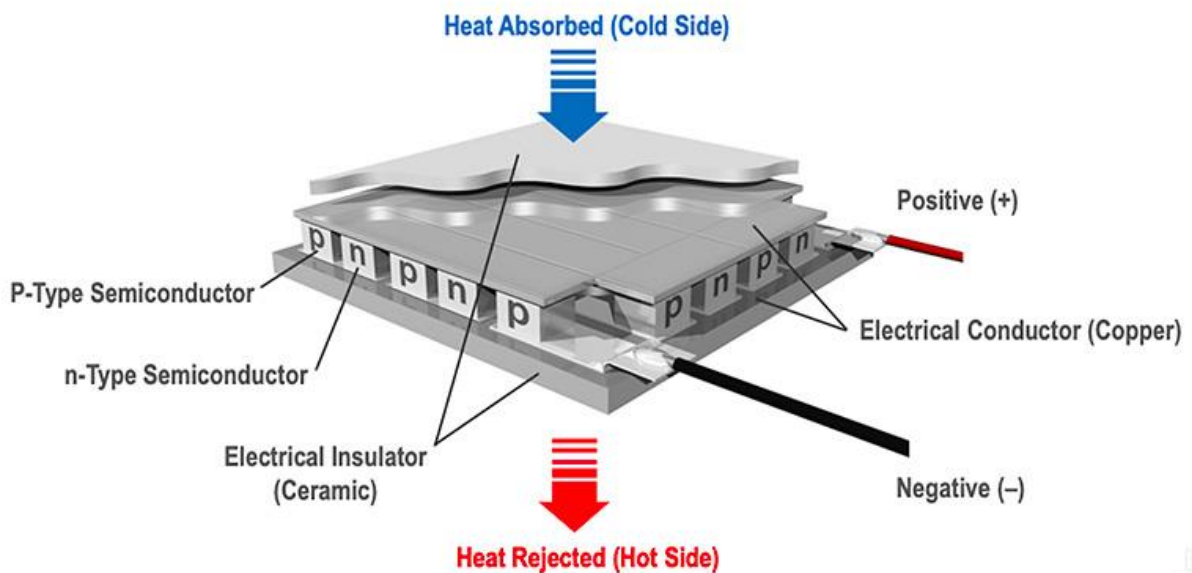
## 4. Termoelektrični modul

Iako su ranije spomenuta tri termoelektrična koncepta, za razvoj termoelektričnih modula najviše je zaslužan efekt objašnjen od strane fizičara Peltiera. Upravo se zbog toga takvi moduli češće nazivaju Peltierovim modulima, odnosno Peltierovim uređajima.

### 4.1. Komponente

Termoelektrični moduli su zapravo vrlo jednostavnoga dizajna, barem što se tiče standardnih modela. Svaki Peltierov modul sastoji se od sljedećih komponenata (Smoot, 2018):

- 1) Pozitivne i negativne električne žice kroz koju se dovodi istosmjerna struja
- 2) Višestruko povezanih P-tip i N-tip poluvodiča
- 3) Električnog izolatora, najčešće keramika
- 4) Električnog vodiča, najčešće bakar



Slika 1. Termoelektrični modul (MedicalDesign&Outsourcing, bet dat.)

## 4.2. Karakteristike

Svrha Peltierovog modula najčešće je odvođenje topline sa željenog objekta, no ni zagrijavanje nekog objekta kao glavni cilj ovoga uređaja nije iznimka. U oba slučaja, važno je je poznavati osnovne karakteristike, odnosno specifikacije Peltierovog modula.

Svaki Peltierov modul dolazi sa odgovarajućom popratnom dokumentacijom u kojoj su opisana sva njegova važna obilježja. Kako bi u nastavku rada, kada se detaljnije opisuju korišteni termoelektrični moduli, bilo razumljivo koje su im mogućnosti, ovdje će biti prikazane osnovne specifikacije modula („Conrad Electronic SE“, bez dat.):

- 1)  $DT_{max}$  predstavlja maksimalnu temperaturnu razliku između hladne i tople strane modula.
- 2)  $U_{max}$  ili  $V_{max}$  oznaka opisuje koliki je maksimalni napon u voltima dopušteno puštati kroz modul kako bi se postigao  $DT_{max}$
- 3)  $I_{max}$  govori o maksimalnoj količini struje prikazanoj u amperima kako bi se postigao  $DT_{max}$
- 4)  $Q_{max}$  predstavlja maksimalnu količinu energije, odnosno topline prikazanu u vatima koju je modul u mogućnosti prenijeti

## 4.3. Princip rada

Standardni Peltierov modul TEC1-12706 za svoj optimalan rad zahtjeva napon u iznosu od 12V te struju od 6A. Kada se takva istosmjerna struja pusti kroz modul, dolazi do Peltierovog efekta te se jedna strana modula hladi, dok se druga strana zagrijava. Razlog tome je što struja prolazi kroz više parova poluvodiča, od strane N-tipa prema P-tipu poluvodiča. Kako elektroni putuju kroz poluvodiče, tako se sa hladne strane modula apsorbira toplina iz okoline ili tijela kojega se želi ohladiti. S druge strane, energija nastala zbog gibanja elektrona se oslobađa i tako zagrijava tu stranu modula (Crotti, 2019).

## 5. Sustav za upravljanje termoelektričnih modula

Glavni dio ovoga rada je zapravo sustav kojim će se regulirat napon na svakom pojedinom Peltierovom modulu kako bi se postigla željena izlazna temperatura. Za samu realizaciju ovakvoga sustava, korišteno je nekoliko programa te mnoštvo fizičkih komponentata, od napajanja do mikrokontrolera.

### 5.1. Korištene aplikacije i alati

Cjelokupni sustav za upravljanje termoelektričnih modula sastoji se od sljedećih komponentata:

- 1) Termoelektrični, odnosno Peltierovi moduli oznake TEC1-12706. Riječ je o standardnim Peltierovim modulima veličine 40 mm x 40 mm.



Slika 2. TEC1-12706 (Google slike)

Preporučeno je rad na istosmjernoj struji od 6A te napona od 12V. Maksimalna radna temperatura, odnosno temperatura koju može podnijeti zagrijana strana modula iznosi 138°C. Životni vijek modula iznosi 200,000 radnih sati. Tablicom ispod prikazana su najvažnija obilježja upravo tog modula, a sve oznake objašnjene su prije u radu. Također je važno naglasiti da se svi prikazani rezultati moraju uzeti u obzir sa tolerancijom od 10% („Conrad Electronic SE“, bez dat.).

$DT_{max}$	70
$U_{max}$	16.0
$I_{max}$	6.1
$Q_{max}$	60

Tablica 1. Osnovne specifikacije TEC1-12706 modula („Conrad Electronic SE“, bez dat.).



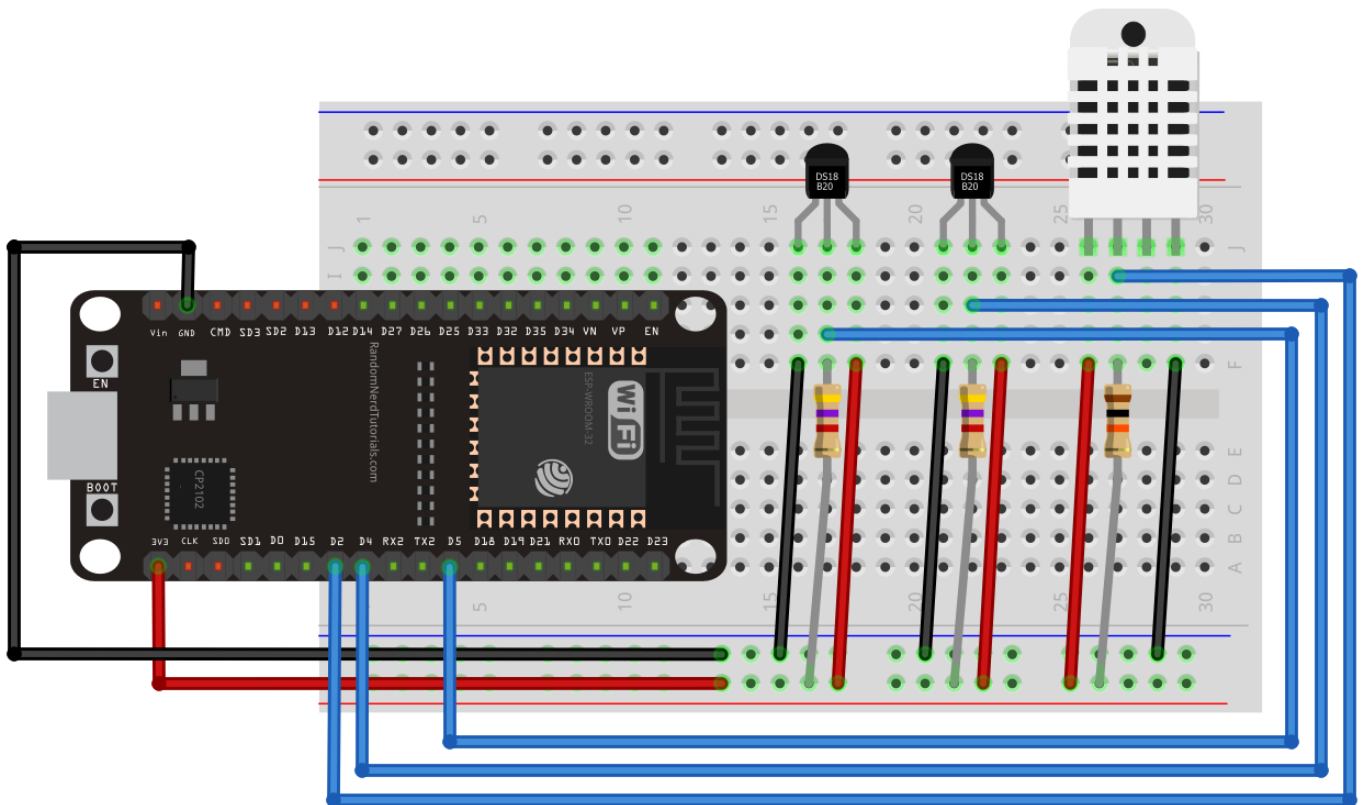
- 2) Hladnjak sa popratnim ventilatorom koji radi na 12V. Potreban je kako bi se posljednji, najzagrijaniji modul, što više rashlađivao.
- 3) ESP32 mikrokontroler kojim se upravljaju svi popratni senzori u ovome sustavu te šalju rezultati u sustav zbog daljnje analize.
- 4) Dva DS18B20 temperaturna senzora koje napaja mikrokontroler s obzirom da rade na naponima između 3V i 5.5V. Najniža temperatura koju mogu izmjeriti iznosi  $-55^{\circ}\text{C}$  dok maksimalna iznosi  $+125^{\circ}\text{C}$  sa tolerancijom od  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ .
- 5) DHT22 senzor kojim se mjeri temperatura i vlažnost okoline. Kao i prijašnji senzori, radi na jednakim naponima, dok temperaturu mjeri u intervalu od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $+80^{\circ}\text{C}$  uz toleranciju od  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ . Vlažnost zraka mjeri od 0 do 100%, a podatke prikuplja svake dvije sekunde.
- 6) Napajanje Keysight E36233A koje napaja dva Peltierova modula. Napajanje ima dva izlaza, od kojih svaki maksimalno može pružati napon u iznosu od 30V te struju od 20A.
- 7) Napajanje Keysight E36231A koje ima samo jedan izlaz te stoga napaja samo jedan Peltierov modul. Izlazni maksimalni napon te struja jednaki su kao i kod prijašnjeg napajanja.
- 8) Napajanje posebno dizajnirano za ventilator kako bi optimalno radio na naponu od 12V.
- 9) Eksperimentalna pločica sa popratnim žicama, dva otpornika snage 4.7k Ohma te jedan otpornik snage 10k Ohma.

Osim fizičkih komponenata, sustav počiva na podršci nekoliko aplikacijskih programa koji su povezani u cjelinu:

- 1) Keysight BenchVue službeni je program kojim se upravlja Keysight uređajima, u ovome slučaju napajanjima.
- 2) Keysight Connection Expert služi kako bi se pravilno povezoao mikrokontroler sa Keysight BenchVue programom s obzirom da ESP32 mikrokontroler ne spada u kategoriju Keysight uređaja.
- 3) Arduino IDE program kojim se konfigurira ESP32 mikrokontroler kako bi pravilno prikupljao podatke putem senzora te ih slao nazad sustavu.

## 5.2. Izrada sustava

Sam naslov ovoga rada govori o mjerenju temperature u vertikalnim konfiguracijama termoelektričnih modula. Kako bi se opravdao takav naziv, putem ESP32 mikrokontrolera konfigurirana su tri zasebna temperaturna senzora. Shematski prikaz spajanja ESP32 mikrokontrolera sa trima sensorima prikazan je sljedećom slikom („ESP32 DS18B20“, bez dat.).



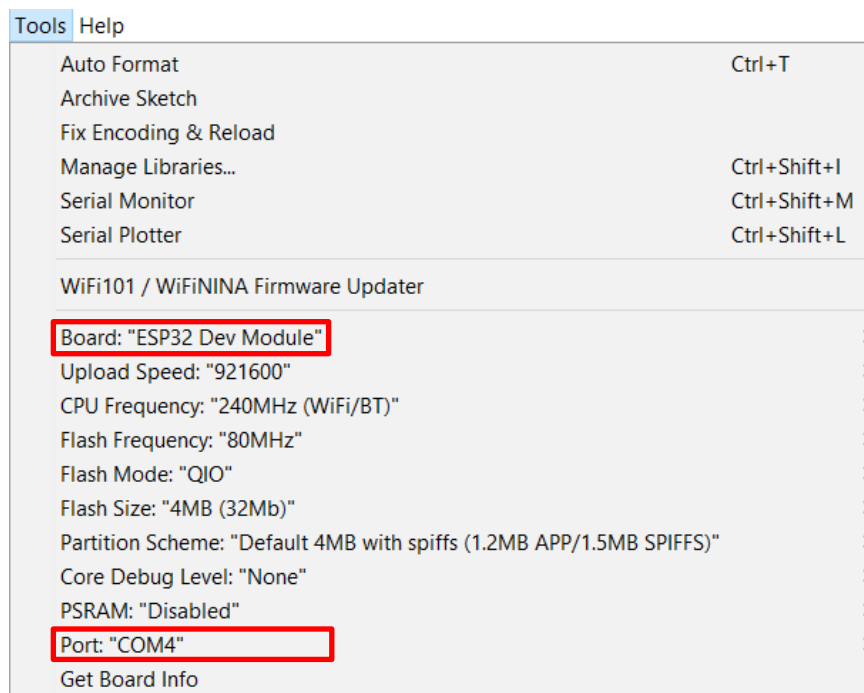
Slika 3. Shematski prikaz spajanja (autorski rad u programu Fritzing)

Na slici 3 su prikazana dva DS18B20 senzora (crni) te jedan DHT22 senzor (bijeli). S obzirom da je slika izrađena u besplatnom programu Fritzing, ovaj prikaz ne treba shvaćati doslovno jer program ne sadrži identične komponente onima koje su korištene u izradi ovoga sustava. Na primjer, ESP32 mikrokontroler nije jednak onome koji je korišten u stvarnosti, no to je najbliži prikaz korištenoga mikrokontrolera. Isto vrijedi i za DS18B20 senzore. U stvarnosti su korišteni senzori istog modela, samo što su vodootporni i u obliku kabla. Važno je naglasiti da su se kod spajanja DS18B20 senzora koristili otpornici snage 4.7k Ohma, dok se kod spajanja DHT22 senzora koristio otpornik snage 10k Ohma („ESP32 DHT11/DHT22“, bez dat.).

## 5.2.1. Arduino IDE

Naravno, kako bi ESP32 mikrokontroler mogao komunicirati sa sensorima, ali i sa osobnim računalom na koje šalje podatke, potrebno ga je konfigurirati, odnosno programirati. Za to je korišten program Arduino IDE. Mikrokontroler se spaja putem USB priključka na računalo te putem Arduino IDE sučelja kreće konfiguracija.

Prvo je potrebno prepoznati uređaj, odnosno mikrokontroler te podesiti pravilne parametre kako bi se on mogao ispravno koristiti, ali i konfigurirati. Klikom na tipku „*Tools*“ otvara se padajući izbornik prikazan slikom 4 gdje je važno odabrati polja označena crvenom bojom. Prvo polje „*Board*“ govori o kojemu je zapravo mikrokontroleru riječ te nakon što se odabere pravilan uređaj, ostatak parametara se postavi automatski, osim polja „*Port*“ koji je potrebno ručno odabrati. On prikazuje ulaz na koji je mikrokontroler spojen preko USB priključka, u ovome slučaju riječ je o ulazu „COM4“.



Slika 4. Odabir pravilne konfiguracije za ESP32 u Arduino IDE programu

Nakon postavljanja tih parametara, potrebno je poslati signal mikrokontroleru kako bi se osiguralo da je veza uspješna. Kasnije započinje programiranje samog mikrokontrolera kako bi komunicirao sa sensorima te rezultate slao nazad korisniku. Programski kod bit će prikazan u nastavku, nakon čega slijedi njegovo objašnjenje.

```

1      #include "DHT.h"
2      #include <OneWire.h>
3      #include <DallasTemperature.h>
4
5      #define DHTPIN 5
6      #define DHTTYPE DHT22
7
8      const int tempWireHigh = 13;
9      const int tempWireLow = 14;
10
11     DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
12
13     OneWire tempHigh(tempWireHigh);
14     DallasTemperature firstSensor(&tempHigh);
15
16     OneWire tempLow(tempWireLow);
17     DallasTemperature scndSensor(&tempLow);
18
19     void setup() {
20         Serial.begin(9600);
21
22         dht.begin();
23         firstSensor.begin();
24         scndSensor.begin();
25     }
26
27     void loop() {
28
29         if (Serial.available()){
30             int state = Serial.parseInt();
31
32             if (state == 1){
33                 firstSensor.requestTemperatures();
34                 scndSensor.requestTemperatures();
35
36                 float firstTemperatureC = firstSensor.getTempCByIndex(0);
37                 float scndTemperatureC = scndSensor.getTempCByIndex(0);
38
39                 float humidity = dht.readHumidity();
40                 float ambientTemperatureC = dht.readTemperature();
41
42                 Serial.print("Vlznost zraka: ");
43                 Serial.print(humidity);
44                 Serial.print("%, ");
45
46                 Serial.print("Temperatura okoline: ");
47                 Serial.print(ambientTemperatureC);
48                 Serial.print("°C, ");
49
50                 Serial.print("Temperatura zagrijane strane: ");
51                 Serial.print(firstTemperatureC);
52                 Serial.print("°C, ");
53
54                 Serial.print(F("Temperatura hladne strane: "));
55                 Serial.print(scndTemperatureC);
56                 Serial.println("°C");
57             }
58         }
59     }

```

Linijama 1,2 i 3 uključuju se biblioteke potrebne za korištenje već prije spomenutih temperaturnih senzora. Kako je riječ o netipičnim sensorima, biblioteke nisu početno instalirane i uključene u Arduino IDE programu. Kako bi se takve dodatne biblioteke instalirale, potrebno je kliknuti na **Sketch → Include Library → Manage Libraries**. Tada se otvara takozvani *Libary Manager*, odnosno prozor u kojem treba pretražiti i instalirati sljedeće biblioteke:

- 1) DHT sensor library by Adafruit
- 2) OneWire library by Paul Stoffregen
- 3) Dallas Temperature library by Miles Burton

Linija 5 opisuje na koji je „*pin*“ na mikrokontroleru povezan DHT22 senzor, a sljedećom linijom definira se tip senzora koji se koristi, u ovome slučaju DHT22. Na sličan način se kreiraju instance dvaju DS18B20 senzora koje se tada također dodijele zasebnim „*pinovima*“, što je vidljivo u linijama 8 i 9.

Sljedećom naredbom, prikazanom u liniji 11, kreira se DHT objekt zvan *dht* te mu se dodjeljuju parametri definirani linijama 5 i 6, odnosno *pin* te vrsta senzora.

Također je potrebno kreirati instance tipa *OneWire* kako bi senzori mogli komunicirati sa programom, nazvane *tempHigh* i *tempLow* te im dodijeliti prije definirane parametre (linije 13 i 16). Nakon toga, u linijama 14 i 17, definiraju se instance tipa *DallasTemperature* te im se prosljeđuju reference tipa *OneWire*. Senzor koji će mjeriti zagrijanu stranu nazvan je *firstSensor*, dok *scndSensor* predstavlja temperaturni senzor koji će biti zaslužan za najvažniji dio, a to je mjerenje hladne strane termoelektričnog modula.

Svaki program pisan za ESP32 mikrokontroler, sastoji se od dvije ključne metode: *setup* i *loop*. Prva metoda započinje linijom 19 i završava linijom 25 te predstavlja početnu konfiguraciju mikrokontrolera. Druga metoda započinje linijom 27 i završava linijom 59. Ona se izvodi beskonačno mnogo puta, odnosno izvodi se tako dugo koliko je mikrokontroler uključen.

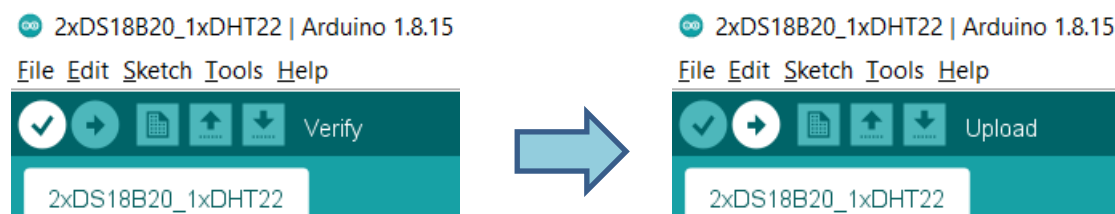
Linijom 20, deklarira se serijski ulaz sa brzinom prijenosa od 9600 bitova po sekundi. Ta brojka je vrlo bitna jer će se kasnije koristiti prilikom konfiguracije sa ostalim programima kako bi mikrokontroler slao podatke odgovarajuće brzine sustavu. Kasnije, linijama 22,23 i 24, inicijaliziraju se sva tri senzora metodom *begin*.

Tada se dolazi do glavnog dijela programa, dijela u kojemu se zapravo vrše sva potrebna mjerenja. Linija 29 provjerava dostupnost serijskog međuspremnik. Taj rezultat međuspremnik parsira te sprema u varijablu *state*. Linija 32 provjerava da li je dohvaćena vrijednost jednaka predefiniranoj vrijednosti, u ovome slučaju provjerava da li je unesena vrijednost jednaka 1. Ako je rezultat usporedbe pozitivan, kreće se na ostatak koda inače se ponovno vraća na liniju 29 s obzirom da je taj cijeli dio koda beskonačna petlja.

Linijom 33 i 34 poziva se funkcija *requestTemperatures* prije stvarnog dohvaćanja temperature. Kasnije su definirane dvije nove varijable tipa *float*, varijabla *firstTemperatureC* i varijabla *scndTemperatureC*. U te varijable spremaju se dohvaćene temperature naredbom *getTempCByIndex*. Slovo „C“ u naredbi govori da će dohvaćene temperature biti prikazane u stupnjevima Celzijevima, a ako se želi dohvatiti u Farenhajtima, jednostavno se slovo „C“ zamijeni slovom „F“ unutar poziva naredbe.

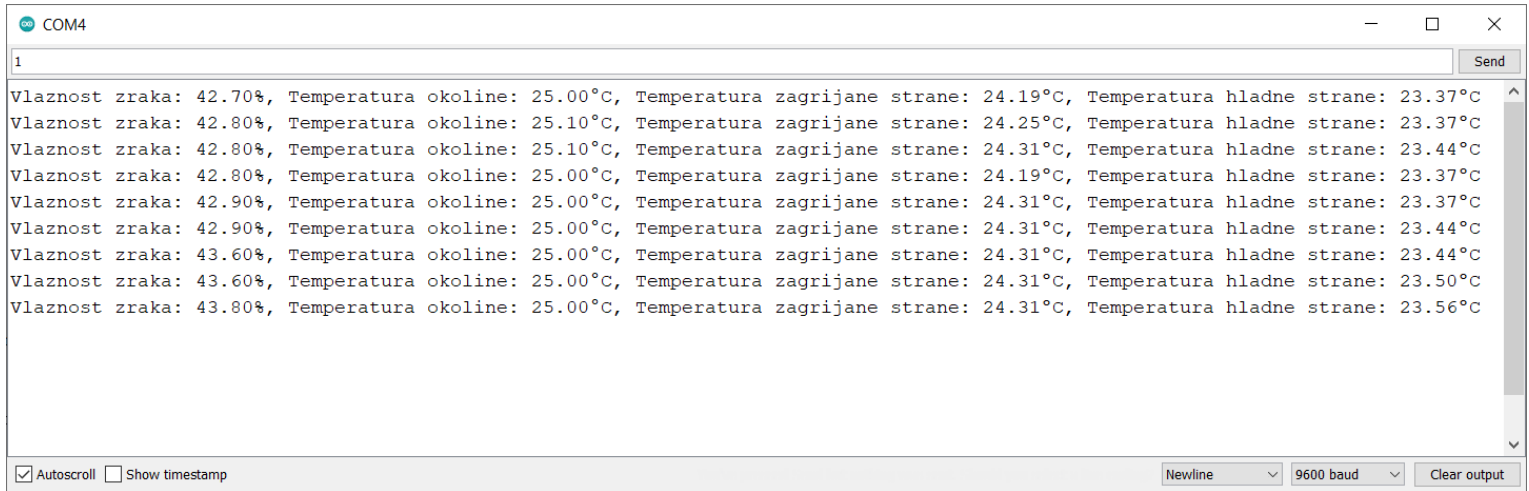
Temperatura okoline i vlažnost zraka dohvaća se naredbama iz linija 39 i 40. Kreirane su nove varijable tipa *float*. U varijablu *humidity* sprema se rezultat vezan uz vlažnost zraka, a dohvaća se jednostavnim pozivom naredbe *readHumidity* nad *dht* objektom. S druge strane, u varijablu *ambientTemperatureC* sprema se rezultat poziva naredbe *readTemperature* također nad objektom *dht*, a rezultat predstavlja temperaturu okoline iskazanu u stupnjevima Celzijevima.

Naposlijetku, preostaje dohvaćene rezultate prikazati na željeni način. Naredbom *Serial.print* uređuje se željeni ispis na način da joj se proslijedi varijabla u kojoj je spremljen neki rezultat ili se jednostavno unese željeni tekst unutar dvostrukih navodnika. Kada se završi sa pisanjem koda, potrebno je kod verificirati te nakon toga poslati na mikrokontroler.



Slika 5. Verificiranje i slanje koda na ESP32

Ukoliko i verifikacija i prijenos koda na mikrokontroler prođu uspješno, moguće je otvoriti takozvani *Serial Monitor* te mikrokontroleru poslati vrijednost. Ukoliko mu se pošalje vrijednost 1, dolazi do ispisa prikazanog kao na slici ispod.

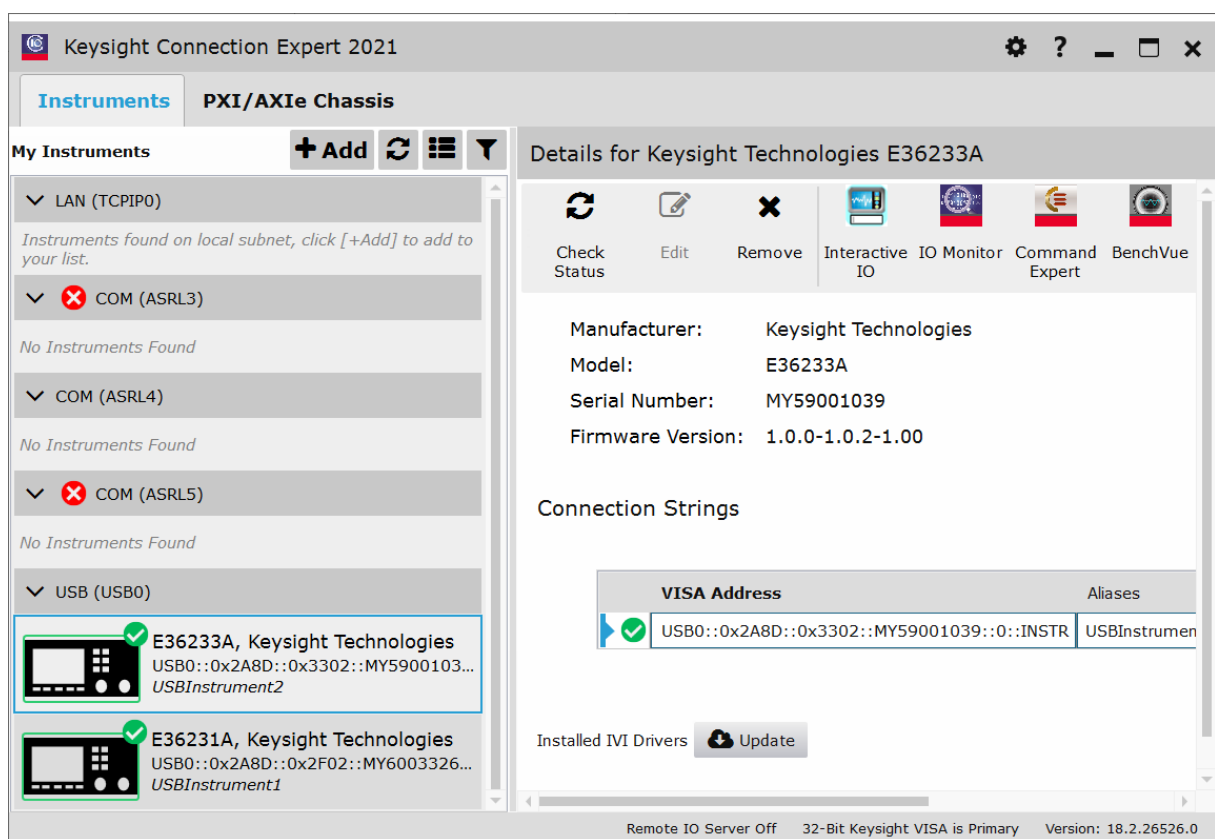


Slika 6. Prikaz ispisa dohvaćenih rezultata

## 5.2.2. Keysight Connection Expert

Program Keysight Connection Expert pruža jednostavan i siguran način spajanja vanjskih uređaja sa osobnim računalom. Automatski detektira sve uređaje marke Keysight koji su spojeni sa računalom te omogućava korisniku uvid u osnovne informacije vezane uz spojene uređaje („Keysight Technologies“, bez dat.).

Na slici 7 vidi se da su na računalu trenutno spojena dva vanjska uređaja. Keysight napajanja E36233A te E26231A automatski su detektirana te su uz te instrumente dostupne dodatne informacije poput naziva proizvođača, vrste modela, serijskog broja i trenutne verzije softvera. S druge strane, mikrokontroler ESP32 treba ručno detektirati.



Slika 7. Keysight Connection Expert sučelje

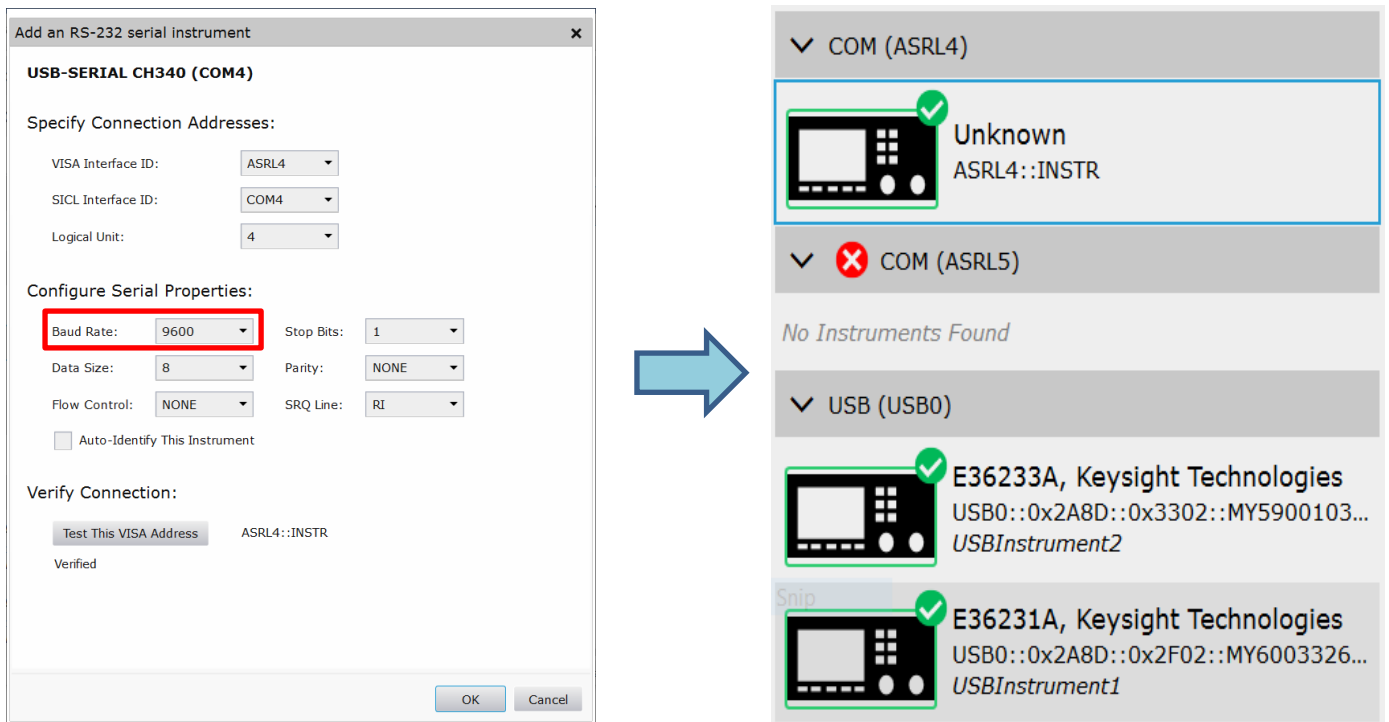
Za ručno dodavanje ESP32 mikrokontrolera, potrebno je provjeriti na koji ulaz je mikrokontroler spojen USB priključkom. Zbog prijašnje konfiguracije u Arduino IDE programu, odabire se ulaz **COM (ASRL4)**. Klikom na njega, dolazi se do glavnih informacija vezanih uz taj ulaz. Potrebno je skenirati ulaz, te nakon toga kliknuti na gumb prikazan na slici 8.



Slika 8. Dodavanje ESP32 mikrokontrolera



Klikom na taj gumb, otvara se novi prozor prikazan na lijevoj strani slike 9 putem kojega se konfiguriraju svi potrebni parametri kako bi ESP32 bio prepoznat od strane Keysight programa. Važno je namjestiti parametar **Boud Rate** na **9600** s obzirom da je tako definiran prilikom programiranja u Arduino IDE programu. Sa desne strane slike sada su prikazana sva tri spojena uređaja. ESP32 spojen je kao fiktivni instrument, bez naziva ili detaljnoga opisa, stoga nosi ime *Unknown*.



Slika 9. Konfiguracija ESP32 mikrokontrolera

### 5.2.3. Keysight BenchVue

Službeni program Keysight kompanije, zvan Keysight BenchVue, omogućava svojim korisnicima jednostavno praćenje svojih instrumenata. Programom je moguće upravljati spojenim instrumentima, vršiti sva pripadajuća mjerenja te ih zapisivati, evidentirati te uspoređivati bez potrebe programiranja („Keysight Technologies, BenchVue“, bez dat.).

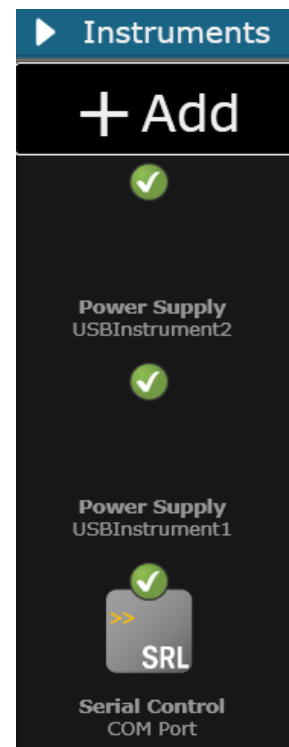
BenchVue program radi sa više od stotinu različitih Keysight instrumenata, poput napajanja i osciloskopa. Vrlo je praktičan jer omogućava paralelno upravljanje više instrumenata što uvelike ubrzava razvoj projekta. Keysight instrumentima moguće je upravljati i mobilnim uređajem ili tabletom. Dovoljno je skenirati QR kod posebno kreiran za svaki instrument unutar BenchVue sučelja.

Dobiveni rezultati se mogu spremati tablično ili pak u obliku grafova, gdje je vrlo jednostavno uspoređivati rezultate svih spojenih instrumenata bez potrebe ručnog usklađivanja i uspoređivanja. Oni se također mogu izvesti u neke vanjske aplikacije radi daljnje analize, poput Microsoft Worda ili Excela.

Možda najzanimljivija sposobnost integrirana je pod nazivom *BenchVue Test Flow*. Ona omogućava kreiranje vlastitih automatiziranih testova, i to uz vrlo jednostavnu *drag-and-drop* tehniku koja potrebno znanje o programiranju svodi na minimum. Upravo je na taj način kreiran sustav koji je tema ovoga rada.

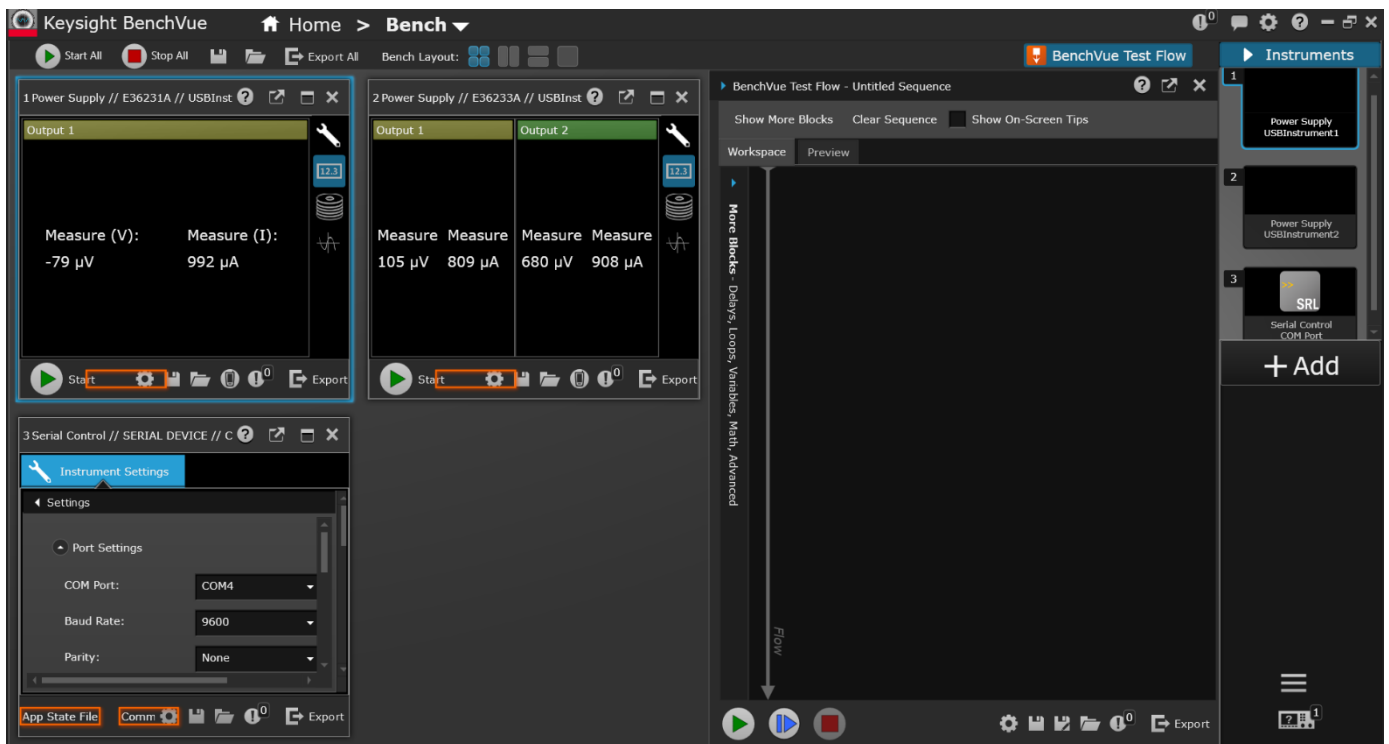
Klikom na gumb „+Add“ otvara se već prije spomenuti program Keysight Connection Expert. Kako su uređaji putem tog programa već prepoznati, tako i Keysight BenchVue odobrava uređaje za daljnji rad. Kako bi se koristila Keysight napajanja, potrebno je zatražiti licencu koja dolazi u nekoliko različitih modela, od kojih postoji i probna besplatna verzija u trajanju od jedne godine. Osim dvaju napajanja (*Power Supply*), prepoznat je i ESP32 mikrokontroler u obliku serijskog kontrolera (*Serial Control*).

Kako bi se krenulo u konfiguraciju uređaja, potrebno je pritisnuti dvostruki klik mišem na svaki pojedini uređaj što će rezultirati otvaranjem sučelja prikazanog slikom 11.



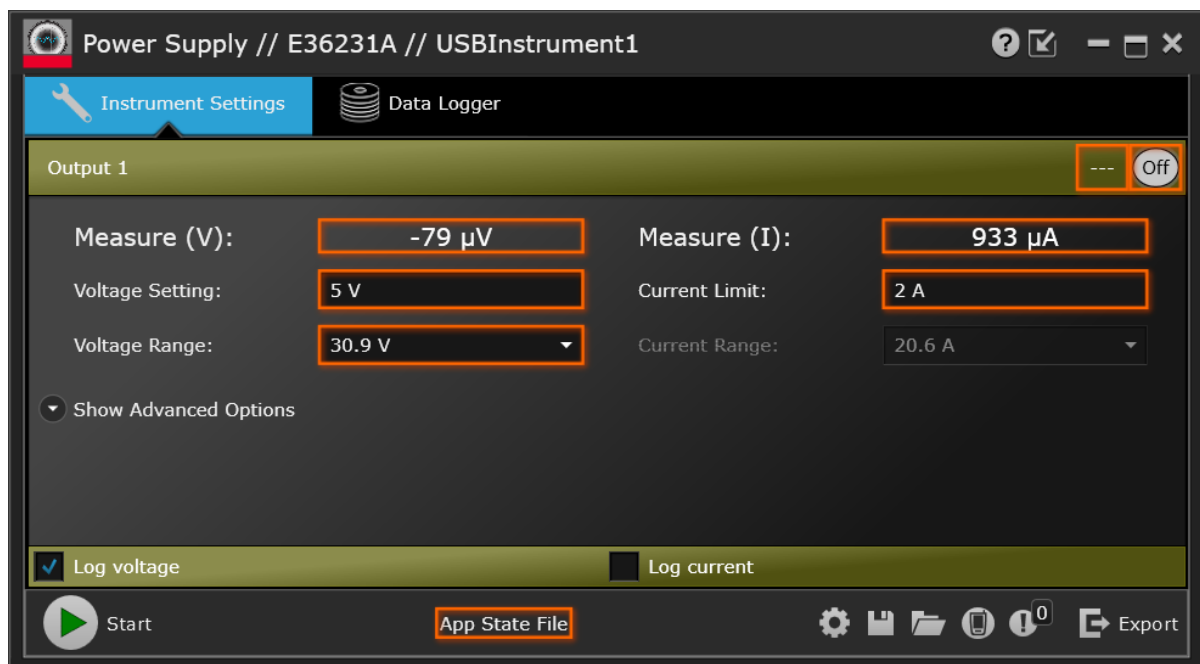
Slika 10. Dodavanje uređaja.

Slikom 11 prikazano je osnovno sučelje BenchVue programa potrebno za rad. S lijeve strane vidljiva su sva tri spojena uređaja, dok je sa desne strane već prije spomenuto *BenchVue Test Flow* sučelje u kojemu će se kreirati programska podrška ovoga sustava.



Slika 11. BenchVue sučelje

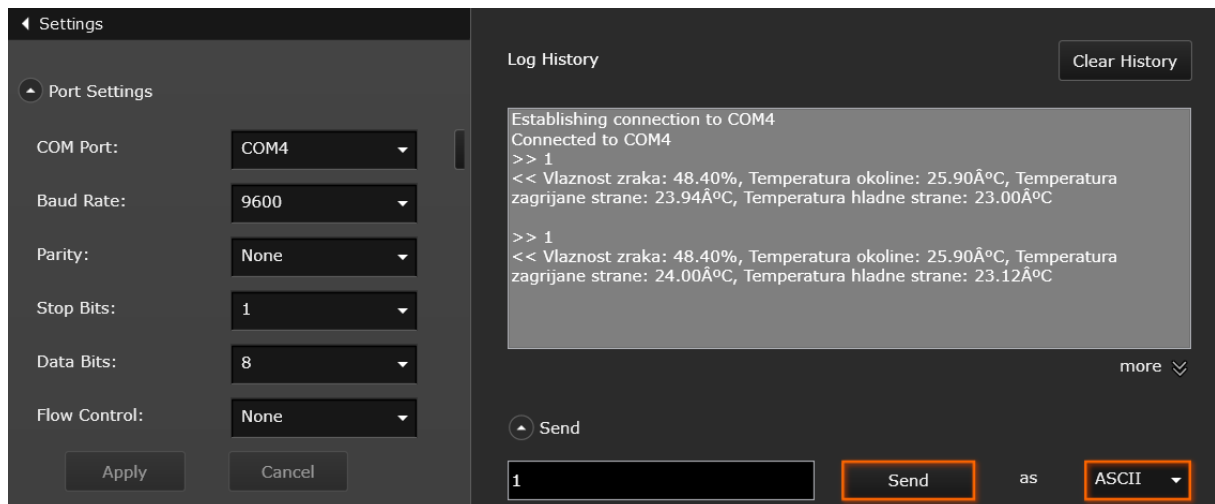
Kao što je već rečeno, svakim instrumentom se može upravljati kroz sljedeće sučelje. Svi parametri koje je moguće podešavati obrubljeni su narančastom bojom, a za potrebe ovoga projekta najvažniji su parametri *Voltage Setting* i *Current Limit*.



Slika 12. Detalji E36231A napajanja u BenchVue programu

Sučelja za napajanja su identična, osim što napajanje E36233A ima dva izlaza pa stoga može i upravljati sa oba izlaza. No sučelje za serijski kontroler, u ovome slučaju ESP32 je nešto kompleksniji. Slika 13 prikazuje upravo to. Ovdje je važno ponovno namjestiti odgovarajuće parametre poput **COM Port** te **Baud Rate** polja te kliknuti na gumb **Apply**. Ukoliko je sve u redu, ispisat će se poruka o uspješnom povezivanju.

Nakon uspješnog povezivanja, potrebno je testirati rad mikrokontrolera. Kako je prije isprogramirano, ESP32 dohvaća podatke iz temperaturnih senzora i vraća nazad korisniku ukoliko mu je prosljeđena vrijednost „1“ klikom na gumb **Send**.



Slika 13. Konfiguracija ESP32 mikrokontrolera u BenchVue programu



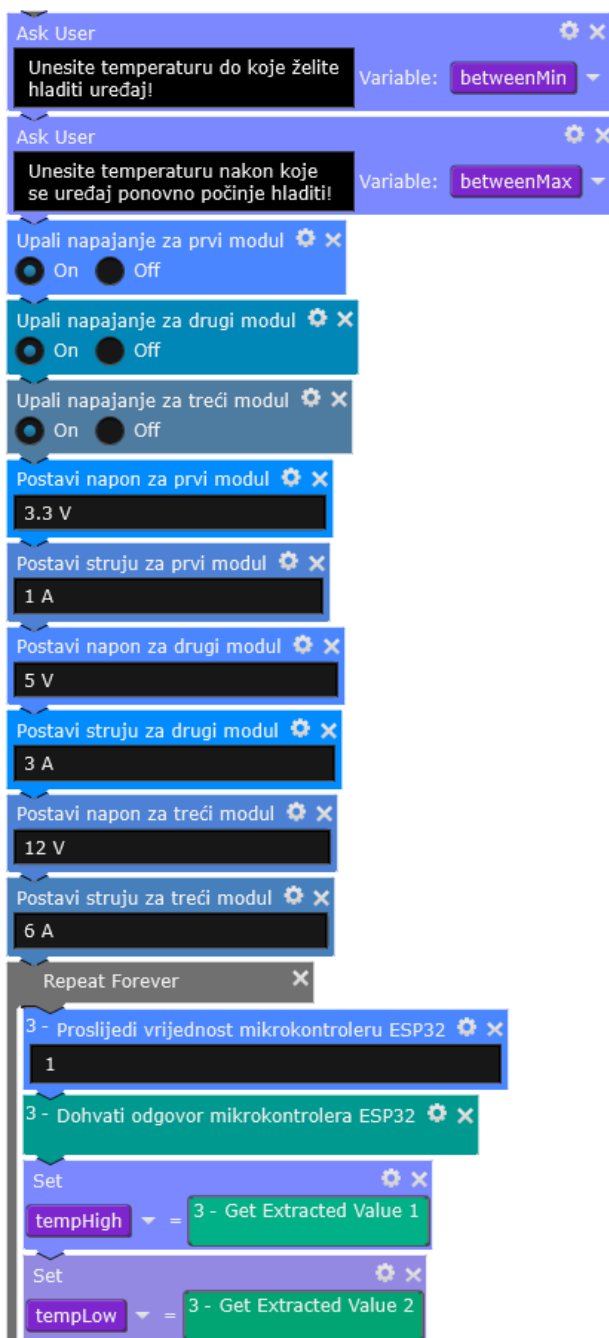
Slika 14. BenchVue Test Flow

Nakon što je testirana veza sa sva tri uređaja, kreće se sa *drag-and-drop* kreiranjem testa za ovaj sustav. Korištenje je vrlo jednostavno te *user friendly*. Takozvani blokovi raspoređeni su u nekoliko kategorija, poput onih osnovnih blokova, blokova koji predstavljaju petlje poput *for* i *while*, matematičkih blokova ili pak još složenijih koji spadaju u kategoriju *Advanced*.

Osim samih blokova, moguće je kreirati i vlastite varijable u koje se spremaju željeni rezultati, odnosno vrijednosti ovisno o programiranome testu.

Test se kreira na način da se sa lijeve strane dohvati željeni blok te odvuče na desnu stranu gdje se tada blokovi nižu jedan ispod drugoga na takozvanoj *Flow* liniji.

Slijedi glavni dio ovoga rada, a to je programski dio na kojemu počiva ovaj sustav za mjerenje temperature termoelektričnih modula.



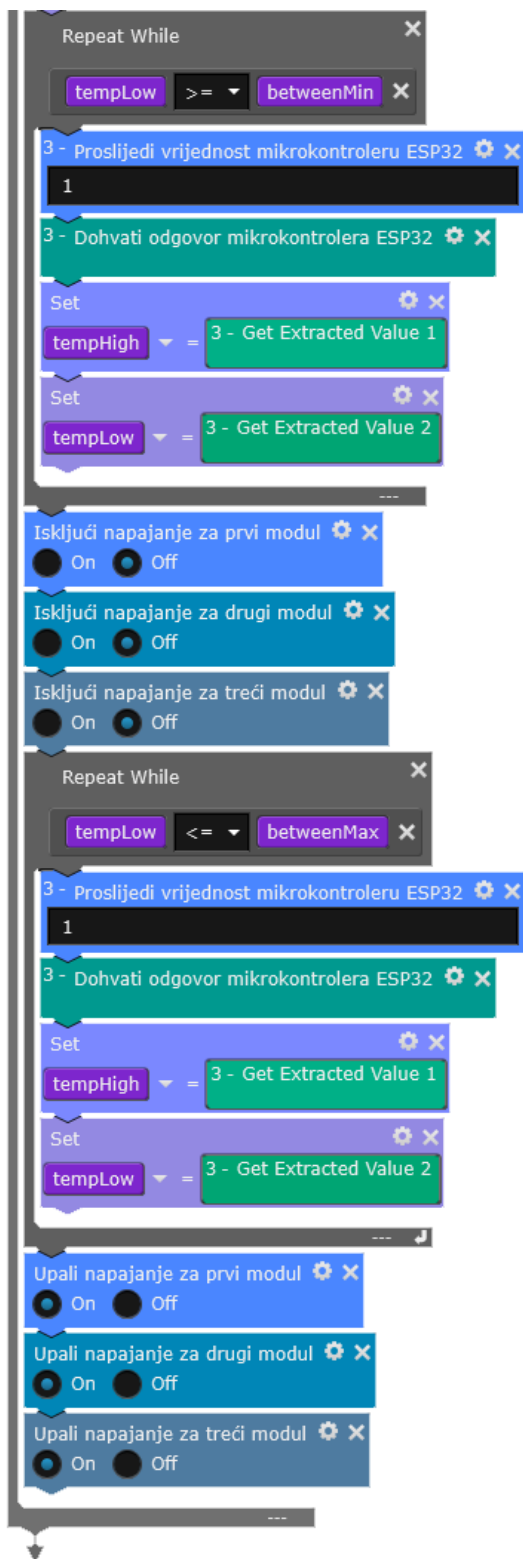
Slika 15. Prvi dio BenchVue Test Flow koda

Program, odnosno sustav započinje tako da pita korisnika do koje temperature želi da se termoelektrični modul ohladi. Korisnik također mora unijeti i temperaturu nakon koje bi se sustav ponovno trebao uključivati te ponovno napajati i time rashlađivati modul. Uneseni podaci se spremaju u varijable *betweenMin* te *betweenMax*.

Sustav posebno uključuje napajanje za svaki pojedini modul. Unosom željenih vrijednosti, sustav šalje signale napajanjima te postavlja napon i jačinu struje za svaki pojedini modul.

Nakon konfiguracije napajanja, dolazi se do beskonačne petlje koja prestaje isključivanjem sustava.

Mikrokontroleru se šalje vrijednost „1“ kako bi se uključio, aktivirao temperaturene senzore, zabilježio i dohvatio rezultate te ih prosljedio sustavu. Dohvaćeni rezultati se spremaju u dvije novokreirane varijable. Senzor koji mjeri temperaturu na zagrijanoj strani sprema podatke u varijablu *tempHigh*, dok senzor zadužen za hladnu stranu sprema podatke u varijablu *tempLow*.



Slika 16. Drugi dio BenchVue Test Flow koda

Tada se dolazi do bloka koji predstavlja *while* petlju. Drugim riječima, blokovi unutar toga bloka izvršavaju se tako dugo dok vrijedi kreirani uvjet, odnosno sve dok je temperatura na hladnoj strani modula veća ili jednaka temperaturi do koje želimo rashlađivati sustav. Blokovi unutar te petlje ponovno dohvaćaju temperature izmjerene sensorima.

Nakon što je postignuta željena niska temperatura, sustav izlazi iz *while* petlje te isključuje napajanja za sva tri modula. Time se prekida njihov rad te se moduli neće rashlađivati ispod željene temperature.

Suprotno prijašnjoj petlji, ova sada provjerava temperaturu hladne strane modula. Blokovi unutar petlje se izvršavaju sve dok se hladna strana zbog prekida rada modula ponovno ne zagrije do postavljene temperature.

Izlaskom iz posljednje petlje, ponovno se uključuju napajanja za sva tri modula. Tada se sustav vraća na početak bloka *Repeat Forever* s obzirom da je riječ o beskonačnoj petlji. Time je osigurano da hladna strana modula približno ostaje između definiranih temperatura koje korisnik unese na početku rada sustava.

## 5.3. Testiranje sustava

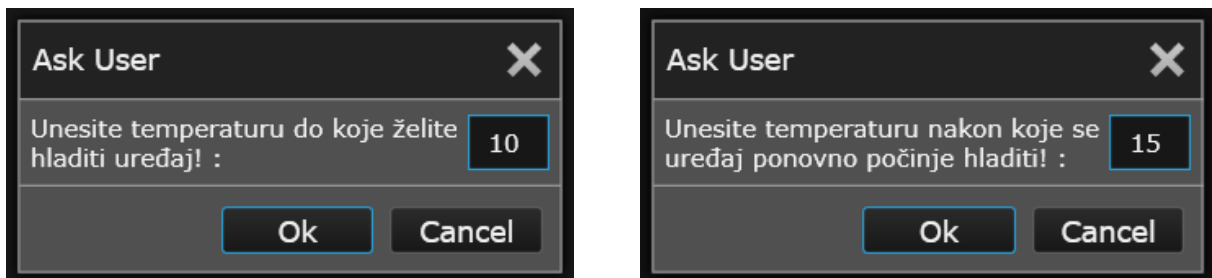
Nakon što je sustav za automatsko mjerenje temperature dovršen, potrebno ga je testirati, odnosno vidjeti kako funkcionira u stvarnosti. U tu svrhu izvršeno je nekoliko simulacija, no u ovome radu biti će prikazane samo dvije.

Prilikom testiranja, vrlo je bitno shvaćati sve pojmove usko vezane uz način rada termoelektričnih modula s obzirom da se sada ne radi samo o jednome modulu, nego o tri modula koji su u međusobnom doticaju. Stoga posljednji modul nema samo funkciju hlađenja svoje hladne strane, nego se mora nositi i sa utjecajem tople strane modula iznad sebe što dodatno otežava stvari.

### 5.3.1. Simulacija 1

Prvom simulacijom pokazat će se što se dešava ukoliko se kroz sva tri modula pusti identična količina napona i struje. Kako ne bi došlo do oštećivanja bilo kojeg od modula, korištena je snaga u iznosu 50% preporučene od strane proizvođača modula.

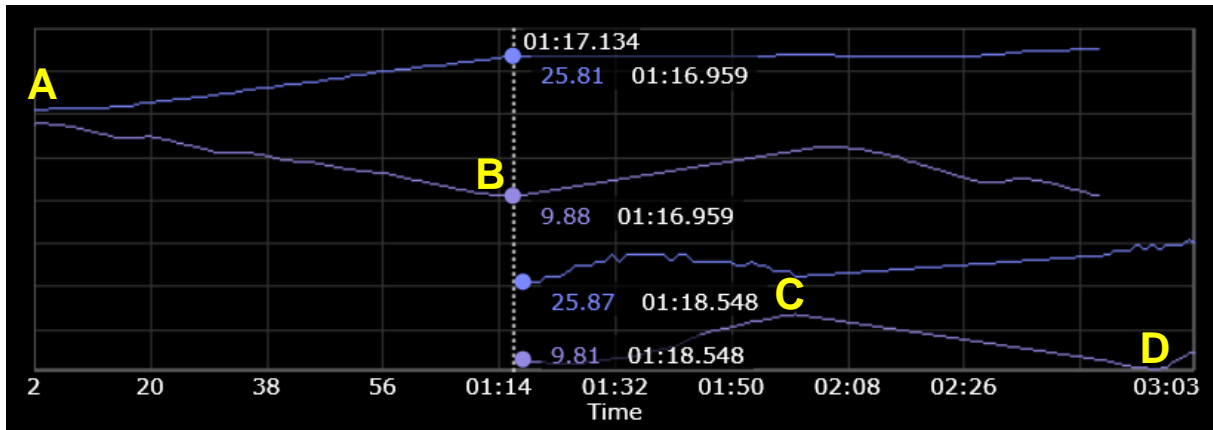
Svaki modul primit će napon u iznosu od 6V te jačinu struje od 3A. Kako sam test ne bi trajao predugo, željena postignuta temperatura biti će za 15°C ispod sobne temperature koja trenutno iznosi oko 25°C uz vlažnost zraka od 48%.



Slika 16. Unos parametara sustava

Nakon što se unesu početne vrijednosti, sustav započinje sa radom. Odnos zagrijane i hladne strane modula prikazan je slikom 17. Program započinje u točki A dok je točkom B prikazano postizanje željene temperature od 10°C nakon jedne minute i 17 sekundi. Nakon toga se napajanje modulima obustavlja. Hladna strana modula se još nekoliko sekundi hladi, te se nakon toga postepeno zagrijava sve do točke C zbog utjecaja tople strane modula, ali i sobne temperature. Topla strana modula se također nastavlja kretati u prvobitnom stanju, odnosno nastavlja se grijati, no nakon 20-tak sekundi se i ona počinje rashlađivati zbog utjecaja okolne sobne temperature. Nakon što senzor koji mjeri hladnu stranu modula očita da se temperatura podigla do unesenih 15°C, sustav vraća napajanje modulima te ih tako

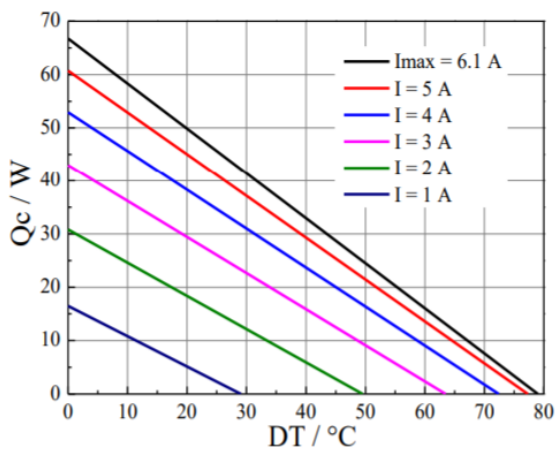
ponovno hladi. Senzor koji mjeri toplu stranu modula nije dostizao temperature veće od 31°C, no zapravo to nije točan iznos tople strane senzora. Kako je ona direktno zalijepljena termalnom pastom za hladnjak, nemoguće je izmjeriti točnu temperaturu te tople strane, nego samo temperaturu oko modula koja se zagrijavanjem širi na hladnjak.



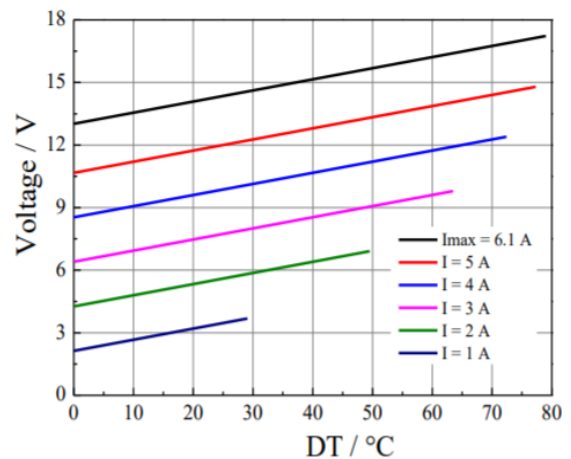
Slika 17. Grafički prikaz rezultata prve simulacije

### 5.3.2. Simulacija 2

Simulacijom 1 prikazan je rad sustava ukoliko se kroz sva tri modula pusti jednak napon i struja. U ovoj simulaciji, napon i struja biti će matematički određeni uz pomoć službenih specifikacija modula („Conrad Electronic SE“, bez dat.).



Slika 18. Omjer DT i Q  
Conrad Electronic SE (bez dat.)



Slika 19. Omjer DT i U  
Conrad Electronic SE (bez dat.)



Slika 18 prikazuje ovisnost struje  $I$ , temperaturne razlike  $DT$  i topline  $Q_c$ . Slika desno također prikazuje struju  $I$  te temperaturnu razliku  $DT$ , ali u ovisnosti o naponu  $V$ . Koristeći ta dva grafa, izračunate su optimalnije početne konfiguracije od one unesenih kod simulacije 1.

Prilikom izračunavanja, korišten je takozvani *top-down* pristup, odnosno pristup odozgo prema dolje (Curious Scientist, 2020). To znači da će se prvo računati konfiguracija za prvi, gornji modul, a naposljetku za zadnji, donji modul koji je pričvršćen za hladnjak. Prvi modul mora primiti najmanju količinu napona kako se ne bi previše zagrijavao i na taj način otežavao hlađenje modula ispod sebe. Jednostavnim riječima, svaki modul koji iznad sebe mora hladiti toplu stranu drugoga modula, mora primiti veću količinu napona.

**Prvi modul** primit će snagu struje u iznosu od 1A te napon od 3.3V. Sukladno tome, gledajući graf na slici 19, maksimalna temperaturna razlika iznositi će 25°C. Sada kada se zna  $DT$ , grafom na slici 18 određuje se snaga hlađenja u vatima koja iznosi približno 3W. Također je potrebno izračunati snagu zbog koje se modul zagrijava puštanjem struje i napona, koja iznosi 3.3W. Ukupna snaga koja će biti ispuštena na zagrijanoj strani modula tada iznosi 6.6W.

$$\begin{aligned}I_1 &= 1A, U_1 = 3.3V, DT_1 = 25^\circ C, Q_{c1} = 3W \\P_1 &= I_1 * U_1 = 3.3W \\Q_{ukupno1} &= P_1 + Q_{c1} = 6.6W\end{aligned}$$

**Drugi modul** tada mora izdržati snagu zagrijavanja prvog modula sumirano sa snagom zagrijavanja koju sam proizvodi.  $Q_{c2}$  tada treba biti veća ili jednaka ukupnoj snazi prvog modula. Kako bi se osigurao siguran rad modula, dodatno je dodano 5W na taj izračun te tada  $Q_{c2}$  iznosi 11.6W. Sukladno tome, gledajući grafove, dolazi se do vrijednosti struje u iznosu od 3A, napona 9V te maksimalne temperaturne razlike od 47°C. Snaga koju proizvodi drugi modul jednaka je 27W, a ukupna snaga zagrijane strane tada je 38.6W što će biti prikazano izračunom ispod.

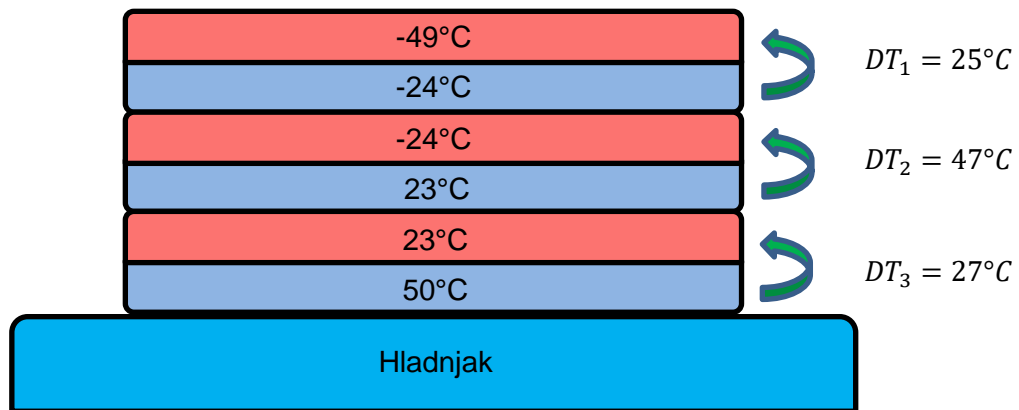
$$\begin{aligned}Q_{c2} &= 6.6W + 5W = 11.6W, I_2 = 3A, U_2 = 9V, DT_2 = 47^\circ C \\P_2 &= I_2 * U_2 = 27W \\Q_{ukupno2} &= P_2 + Q_{c2} = 38.6W\end{aligned}$$

**Treći modul** mora izdržati najveću snagu zagrijavanja, te će stoga primiti i najveću količinu napona i struje. Kako je snaga zagrijavanja drugog modula 38.6W, treći modul mora izdržati minimalno 43.6W iz sigurnosnih razloga. Ponovno gledajući grafove, dolazi se do zaključka da treći modul treba jačinu struje u iznosu od 6A te napon od 14V. Time se dolazi do maksimalne

temperaturne razlike od 27°C. Izračun snage u ovome slučaju nije bitan s obzirom da njegova topla strana neće direktno utjecati ni na jedan modul, već će biti hladjena hladnjakom i ventilatorom.

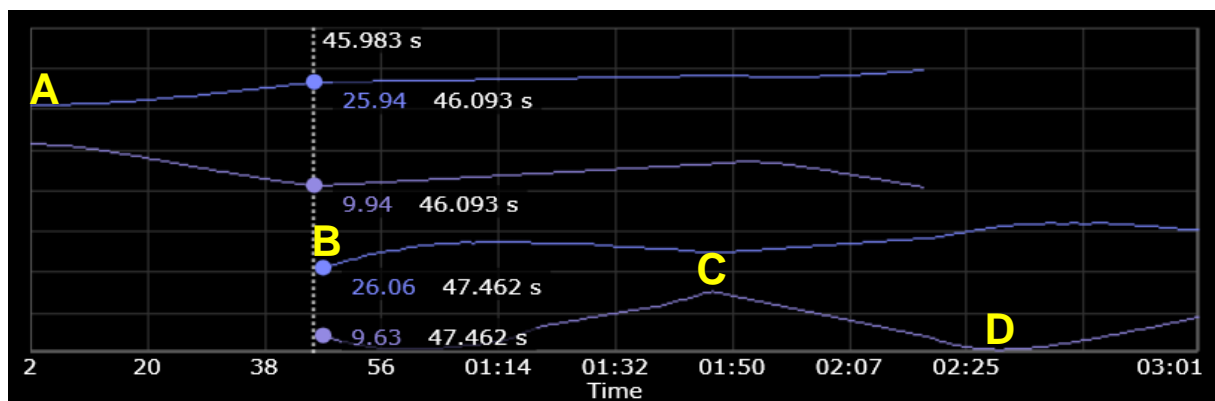
$$Q_{c3} = 38.6W + 5W = 43.6W, I_3 = 6A, U_3 = 14V, DT_3 = 27^\circ C$$

Nakon svih izračuna, moguće je teoretski odrediti minimalnu temperaturu hladne strane prvoga modula, koja tada iznosi -49°C (uz pretpostavku da će zagrijana strana posljednjeg modula iznositi 50°C). Naravno to je u stvarnosti nemoguće postići zbog nesavršenosti uređaja, ali i raznih vanjskih utjecaja poput sobne temperature. Slikom 20 prikazan je model sa tri vertikalno postavljena termoelektrična modula te prijenos topline između svakoga od njih.



Slika 20. Razmjena topline između modula (autorski rad)

Unosom izračunatih vrijednosti u sustav, te postavljanjem parametara ( minimalna temperatura = 10°C, temperatura ponovnog hlađenja = 15°C) dobiveni su sljedeći rezultati. U ovoj simulaciji, dolazak do željene temperature u usporedbi sa prvom simulacijom je znatno kraći te iznosi 46 sekundi. Sukladno time, interval između točaka B i C je veći te iznosi više od jedne minute, dok je za ponovno hlađenje modula potrebno svega pola minute (C → D).



Slika 21. Grafički prikaz rezultata druge simulacije

## 5.4. Usporedba rezultata

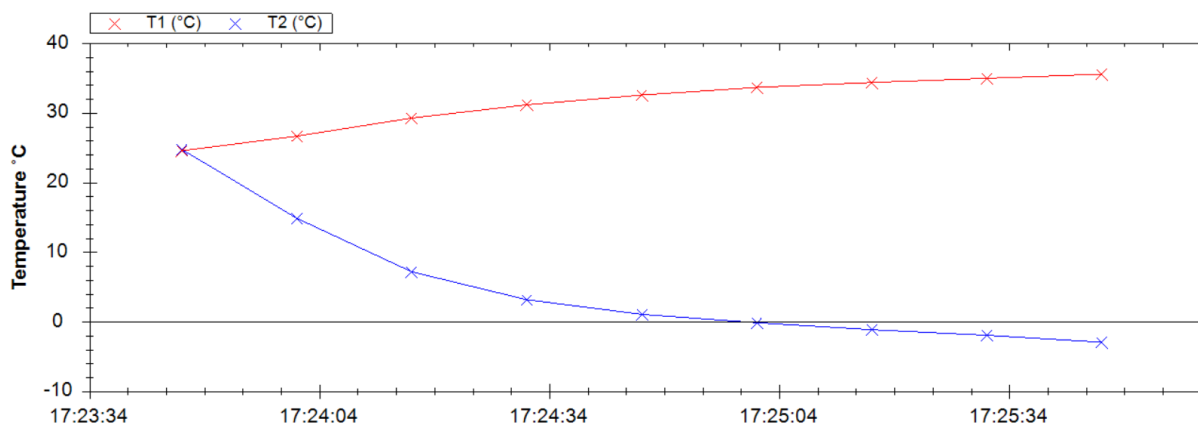
U prijašnjem poglavlju, rezultati su prikazani grafovima. Ovdje će rezultati biti uspoređeni tablično kako bi se bolje prikazala vremenska ovisnost ostvarenih rezultata o unesenim parametrima. Rezultati prikazani tablično dobiveni su mnogo preciznijim mjernim uređajem, točnije temperaturnim instrumentom Voltcraft modela PL-125-T2USB VS. Rezultati optimalnog testiranja biti će također prikazani i grafom koji kreira Voltcraft program.

Modul 1: 6V, 3A				Modul 2: 6V, 3A				Modul 3: 6V, 3A									
0 s		15 s		30 s		45 s		60 s		75 s		90 s		105 s		120 s	
$T_C$	$T_H$	$T_C$	$T_H$	$T_C$	$T_H$	$T_C$	$T_H$	$T_C$	$T_H$	$T_C$	$T_H$	$T_C$	$T_H$	$T_C$	$T_H$	$T_C$	$T_H$
24.4°C	24.6°C	14.8°C	25.3°C	11.0°C	26.6°C	8.0°C	27.6°C	6.5°C	28.4°C	4.9°C	28.8°C	4.4°C	29.3°C	2.5°C	29.6°C	1.3°C	29.8°C

Tablica 2. Rezultati prve simulacije snimljeni Voltcraft uređajem

Modul 1: 3.3V, 1A				Modul 2: 9V, 3A				Modul 3: 14V, 6A									
0 s		15 s		30 s		45 s		60 s		75 s		90 s		105 s		120 s	
$T_C$	$T_H$	$T_C$	$T_H$	$T_C$	$T_H$	$T_C$	$T_H$	$T_C$	$T_H$	$T_C$	$T_H$	$T_C$	$T_H$	$T_C$	$T_H$	$T_C$	$T_H$
24.6°C	24.6°C	14.6°C	26.7°C	7.2°C	29.3°C	3.2°C	31.2°C	1.1°C	32.6°C	-0.1°C	33.7°C	-1.1°C	34.4°C	-1.9°C	35.1°C	-2.9°C	35.6°C

Tablica 3. Rezultati druge simulacije snimljeni Voltcraft uređajem



Slika 22. Grafički prikaz rezultata druge simulacije

## 6. Usporedba s tradicionalnim sustavima hlađenja

Kao što je već rečeno, termoelektrični moduli su nova vrsta tehnologije koja je svakim danom sve naprednija te se tek očekuju značajnija otkrića. U nastavku ovoga poglavlja biti će opisane glavne prednosti termoelektričnih modula u odnosu na tradicionalne sustave hlađenja, ali i njihovi najznačajniji nedostaci.

### 6.1. Prednosti

Za razliku od tradicionalnih sustava, termoelektrični moduli su nečujni te ne stvaraju nikakve vibracije s obzirom da nemaju niti jedan pokretan dio. Zbog svoje male veličine, ali i zanemarive težine, vrlo su praktični i mobilni te ih je moguće instalirati na mjesta gdje tradicionalni sustavi hlađenja ne mogu ni doprijeti. Prilikom instalacije, nije bitan položaj modula. Moguće ih je postaviti vertikalno, horizontalno ili pod bilo kojim drugim stupnjem nagiba. Također su ekološki prihvatljivi s obzirom da ne zahtijevaju nikakva zapaljiva ili rashladna kemijska sredstva. Zanimljivo je to što su termoelektrični moduli izrazito jednostavni za proizvesti te su zbog toga razloga i vrlo pristupačne cijene. Primjera radi, jedan modul TEC1-12706 koji je korišten u izradi ovoga rada košta oko 3\$, što je nešto manje od 20 kuna. Njihovo korištenje zahtjeva vrlo malo održavanja, dok im životni vijek trajanja iznosi oko 200,000 radnih sati. Ukoliko dođe do nekog kvara ili se životni vijek modula iskoristi, vrlo ih je lako zamijeniti novima. Također, osim hlađenja mogu poslužiti i kao vrlo dobar izvor topline, što se jednostavno postiže promjenom polariteta prema modulu. Za svoj rad koriste istosmjernu struju, koja je u geografskome, ali i tehničkome smislu, mnogo jednostavnija od izmjenične struje. I na posljetku, ono najbitnije, termoelektrični moduli su popularni zbog svoje precizne regulacije izlazne temperature.

### 6.2. Nedostaci

Termoelektrični moduli naravno nisu savršeni te stoga imaju određene nedostatke s obzirom na tradicionalne sustave hlađenja. Ako se koristi samo jedan modul, on neće biti dovoljan za postizanje niskih temperatura, pa čak niti za postizanje temperatura manjih od 10°C ukoliko neće imati adekvatno rješenje za odvođenje topline sa zagrijane strane modula. Kako bi se postigle niske temperature, potrebno je kreirati sustav poput sustava u ovome radu, što traži određeno znanje, ali i vrijeme. Samo hlađenje je često sporije u odnosu na

tradicionalne sustave. I najvažnije, energetski su vrlo neefikasni upravo zbog toga što se jedna strana hladi dok se druga zagrijava što naposljetku dovodi do izjednačavanja temperatura.

## 7. Uporaba termoelektričnih modula

Unatoč poprilično niskoj učinkovitosti u intervalu od 2 do 10%, termoelektrični moduli koriste se svakodnevno i to u širokoj primjeni (O'Driscoll, 2019).

- Prisutni su u mjernim uređajima, kućanskim aparatima, automobilima, prenosivim uređajima.
- Koriste se naravno kao rashladni uređaji, ali i kao uređaji za zagrijavanje određenog objekta.
- Čest su dio industrijskih printera, skupocjenih lasera te sastavni dio složenije elektronike.
- Koriste se i u medicini u takozvanoj *Lab-on-a-chip* tehnologiji kod složenijih dijagnoza koje zahtijevaju precizno hlađenje uređaja („Peltier Element Applications“, bez dat.).
- Također su od pomoći prilikom održavanja referentnih izvora svjetlosti na konstantnoj temperaturi kako bi se postigao stabilan izvor svjetlosti.
- Kako bi se smanjila takozvana *image noise*, odnosno vibracija slike, koriste se i u naočalama za noćni vid te u nišanima za oružje („Peltier Element Applications“, bez dat.).
- Neizostavan su dio detektora radijacije te infracrvenih detektora.
- Električni automobili također koriste termoelektrično hlađenje u svojim baterijama, posebice prilikom njihovog punjenja.
- Hlađenje crne kutije u avionima također je posljedica utjecaja termoelektričnih modula.
- Koriste se i u vinskim kabinetima te u još mnogo toga.

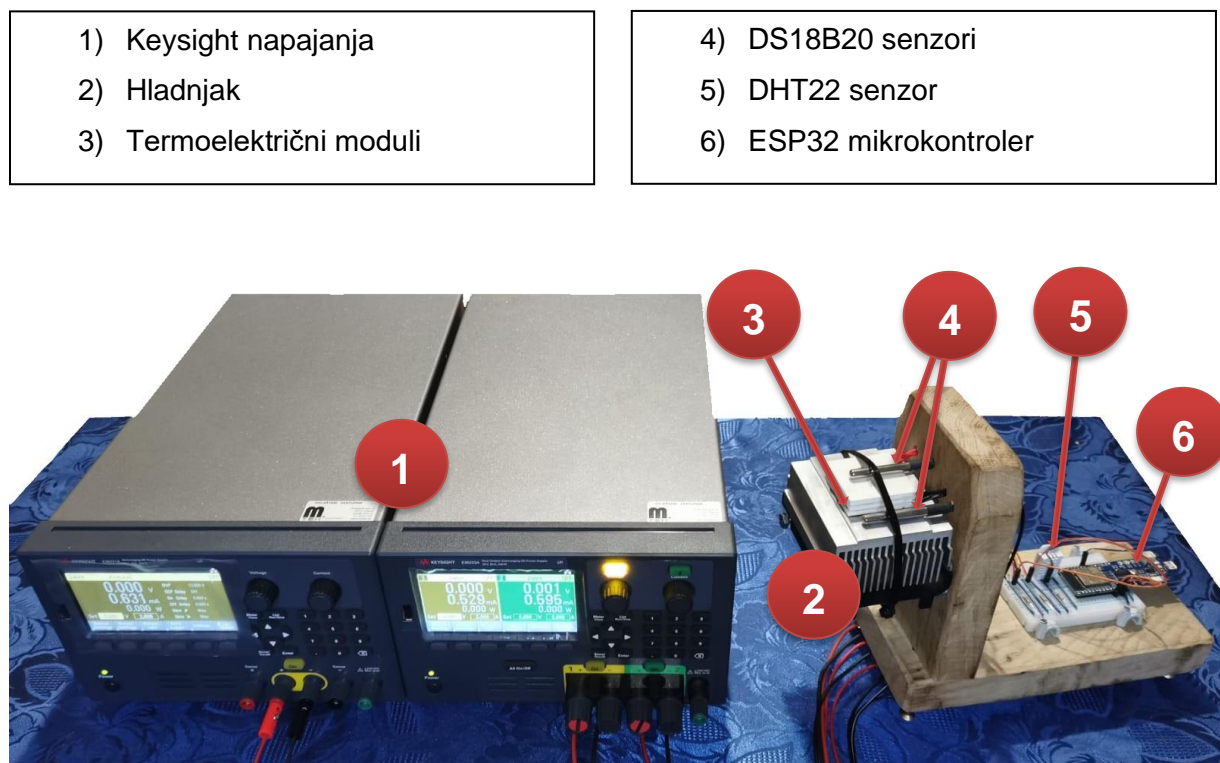
## 8. Zaključak

Iako otkrivena prije stotinu godina, termoelektrična tehnologija doživjela je ogroman skok u razvoju, ali i potražnji posljednjih nekoliko godina. Zbog dominantnosti složenijih električnih uređaja, došla je i potreba za adekvatnim hlađenjem. Upravo se tu iskazuju termoelektrični moduli.

Pristupačnost, niska cijena, prenosivost i nečujnost rada te preciznost regulacije, glavni su razlozi popularnosti termoelektričnih modula te temelj zašto će tek biti traženi u bliskoj budućnosti. Zbog nepostojanja pokretnih dijelova, termoelektrične module koriste velike organizacije poput NASA-e te DOD-a (*Department of Defence*).

Kao i sve drugo, ti moduli nisu savršeni te su u nekim primjenama još daleko iza standardnih tradicionalnih sustava za hlađenje. Glavni razlog tome je upravo njihova niska učinkovitost, koja će i dalje kočiti termoelektrične module u masovnoj adaptaciji.

Za sam kraj ovoga rada, slikom 23 prikazan je konačan izgled sustava za automatsko mjerenje temperature u vertikalnoj konfiguraciji triju termoelektrična modula.



Slika 23. Izgled sustava (autorski rad)

## Popis literature

- 1) Conrad Electronic SE (bez dat.). Preuzeto 22.8.2021. s [https://asset.re-in.de/add/160267/c1/-/en/000189115DS02/DA\\_TRU-Components-TEC1-12706-Peltier-Element-15V-6.4A-65W-L-x-B-x-H-40-x-40-x-3.8mm.pdf](https://asset.re-in.de/add/160267/c1/-/en/000189115DS02/DA_TRU-Components-TEC1-12706-Peltier-Element-15V-6.4A-65W-L-x-B-x-H-40-x-40-x-3.8mm.pdf)
- 2) Crotti, N. (2019). Thermoelectric cooler solutions for medical applications. Preuzeto 22.8.2021. s <https://www.medicaldesignandoutsourcing.com/thermoelectric-cooler-solutions-for-medical-applications/>
- 3) Curious Scientist (12.6.2020). Stacking of Peltier units - Part 1 [Video file]. Dostupno 27.8.2021. na [https://www.youtube.com/watch?v=kSdJtVYG5OA&t=1514s&ab\\_channel=CuriousScientist](https://www.youtube.com/watch?v=kSdJtVYG5OA&t=1514s&ab_channel=CuriousScientist)
- 4) ESP32 DS18B20 Temperature Sensor with Arduino IDE (bez dat.). Preuzeto 25.8.2021. s <https://randomnerdtutorials.com/esp32-ds18b20-temperature-arduino-ide/>
- 5) ESP32 with DHT11/DHT22 Temperature and Humidity Sensor (bez dat.). Preuzeto 25.8.2021. s <https://randomnerdtutorials.com/esp32-dht11-dht22-temperature-humidity-sensor-arduino-ide/>
- 6) Galović, A. (2014). Termodinamika II, FSB Zagreb.
- 7) I. Šumiga, M. Grđan, J. Huđek (2007). Termoelektrični moduli - fizikalne osnove i smjernice za uporabu. Preuzeto 1.6.2021. s <https://hrcak.srce.hr/85970>
- 8) Keysight Technologies (bez dat.) IO Libraries Suite Downloads. Preuzeto 26.8.2021. s <https://www.keysight.com/zz/en/lib/software-detail/computer-software/io-libraries-suite-downloads-2175637.html>
- 9) Keysight Technologies (bez dat.) PathWave BenchVue Software. Preuzeto 26.8.2021. s <https://www.keysight.com/zz/en/products/software/pathwave-test-software/benchvue-software.html>
- 10) Konvekcija (bez dat.). U *Hrvatska enciklopedija*. Konvekcija. Preuzeto 29.5.2021. s <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=32968>
- 11) O'Driscoll, A. (2019). Peltier vs. Compressor-Based Cooling. Preuzeto 27.8.2021. s <https://labincubators.net/blogs/blog/peltier-vs-compressor-based-cooling>
- 12) Peltier (bez dat.). U *Hrvatska enciklopedija*. Preuzeto 4.6.2021. s <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=47414>
- 13) Peltier Element Applications (bez dat.). Preuzeto 27.8.2021. s <https://www.meerstetter.ch/customer-center/compendium/33-peltier-element-applications>

- 14) Prijenos topline – Kondukcija topline. (bez dat.). U Wikipedia. Preuzeto 29.5.2021. s [https://hr.wikipedia.org/wiki/Kondukcija\\_topline](https://hr.wikipedia.org/wiki/Kondukcija_topline)
- 15) Prijenos topline. (bez dat.). U Wikipedia. Preuzeto 29.5.2021. s [https://hr.wikipedia.org/wiki/Prijenos\\_topline](https://hr.wikipedia.org/wiki/Prijenos_topline)
- 16) R. Siegel, i J. Howel. (2002). Thermal Radiation Heat Transfer, Fourth Edition.  
Dostupno: [https://books.google.hr/books?id=O389yQ0-fecC&printsec=frontcover&dq=Thermal+radiation&hl=hr&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Thermal%20radiation&f=false](https://books.google.hr/books?id=O389yQ0-fecC&printsec=frontcover&dq=Thermal+radiation&hl=hr&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=Thermal%20radiation&f=false)
- 17) Refrigeration invention. (bez dat.). Preuzeto 29.5.2021. s <http://www.historyofrefrigeration.com/refrigeration-invention/william-cullen/>
- 18) Seebeckov efekt (bez dat.). U *Hrvatska enciklopedija*. Preuzeto 4.6.2021. s <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=55155>
- 19) Smoot, J. (2018). Choosing and Using Advanced Peltier Modules for Thermoelectric Cooling. Preuzeto 21.8.2021. s <https://www.digikey.com/en/articles/choosing-using-advanced-peltier-modules-thermoelectric-cooling>
- 20) Thermoelectric effect. (bez dat.). U Wikipedia. Preuzeto 1.6.2021. s [https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric\\_effect](https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_effect)



## Popis slika

- 1) Slika 1. MedicalDesign&Outsourcing (bez dat.) Preuzeto 21.8.2021. s <https://www.medicaldesignandoutsourcing.com/thermoelectric-cooler-solutions-for-medical-applications/>
- 2) Slika 2. TEC1-12706. Preuzeto 21.8.2021. s <https://robu.in/wp-content/uploads/2021/01/TEC1-12706-30x30mm-Thermoelectric-Cooler-3.jpg>
- 3) Slika 18. Conrad Electronic SE (bez dat.). Preuzeto 22.8.2021. s [https://asset.rein.de/add/160267/c1/-/en/000189115DS02/DA\\_TRU-Components-TEC1-12706-Peltier-Element-15V-6.4A-65W-L-x-B-x-H-40-x-40-x-3.8mm.pdf](https://asset.rein.de/add/160267/c1/-/en/000189115DS02/DA_TRU-Components-TEC1-12706-Peltier-Element-15V-6.4A-65W-L-x-B-x-H-40-x-40-x-3.8mm.pdf)
- 4) Slika 19. Conrad Electronic SE (bez dat.). Preuzeto 22.8.2021. s [https://asset.rein.de/add/160267/c1/-/en/000189115DS02/DA\\_TRU-Components-TEC1-12706-Peltier-Element-15V-6.4A-65W-L-x-B-x-H-40-x-40-x-3.8mm.pdf](https://asset.rein.de/add/160267/c1/-/en/000189115DS02/DA_TRU-Components-TEC1-12706-Peltier-Element-15V-6.4A-65W-L-x-B-x-H-40-x-40-x-3.8mm.pdf)

## Popis tablica

1. Tablica 1. Conrad Electronic SE (bez dat.). Preuzeto 27.8.2021. s [https://asset.rein.de/add/160267/c1/-/en/000189115DS02/DA\\_TRU-Components-TEC1-12706-Peltier-Element-15V-6.4A-65W-L-x-B-x-H-40-x-40-x-3.8mm.pdf](https://asset.rein.de/add/160267/c1/-/en/000189115DS02/DA_TRU-Components-TEC1-12706-Peltier-Element-15V-6.4A-65W-L-x-B-x-H-40-x-40-x-3.8mm.pdf)