

Ispitivanje nehomogenosti termoparskih osjetnika temperature

Bogdan, Mislav

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:277327>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mislav Bogdan

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Danijel Šestan, dipl. ing.

Student:

Mislav Bogdan

Zagreb, 2023. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Danijelu Šestanu, dipl. ing. na utrošenom vremenu koje je posvetio izradi ovog završnog rada. Njegovi su savjeti, primjedbe i konstruktivne kritike uvelike pridonijele kvaliteti ovog rada.

Također, zahvaljujem obitelji, prijateljima, kolegama i svima onima koji su bili uz mene kroz cjelokupno studiranje.

Mislav Bogdan



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Mislav Bogdan** JMBAG: **0035218524**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje nehomogenosti termoparskih osjetnika temperature**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Thermocouple inhomogeneity testing**

Opis zadatka:

Potrebno je definirati postupak, sastaviti mjernu liniju i provesti ispitivanje nehomogenosti najmanje dvaju termoparskih osjetnika temperature. Ispitivanje je potrebno provesti korištenjem mjernih instrumenata i pomoćne opreme koja je na raspolaganju u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu (FSB LPM). Na temelju rezultata ispitivanja potrebno je procijeniti utjecaj nehomogenosti ispitivanih termoparova na njihove pogreške u mjerenju temperature u temperaturnom rasponu od 150 °C do 1100 °C.

U okviru izrade završnog rada potrebno je:

- Dati pregled teorijskih osnova vezanih uz mjerenje temperature termoparskim osjetnicima.
- Opisati postupak provedbe ispitivanja nehomogenosti termoparskih osjetnika.
- Konstruirati, prikazati shemu i dati opis mjerne linije koja će se koristiti za predmetna ispitivanja.
- Sastaviti mjernu liniju i provesti ispitivanja korištenjem postojećih mjernih instrumenata i pomoćne opreme koja je na raspolaganju u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu (FSB-LPM).
- Prikazati rezultate ispitivanja i provesti procjenu utjecaja nehomogenosti ispitanih termoparskih osjetnika na nesigurnost mjerenja temperature u rasponu od 150 °C do 1100 °C.

Za provedbe umjeravanja koristit će se mjerna oprema Laboratorija za procesna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.
3. rok: 18. 9. 2023.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Danijel Šestan

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD	1
1.1. Termoparovi	1
1.2. Prednosti i nedostaci termoparova	1
1.3. Tipovi termoparova	3
1.4. Seebeckov efekt	4
2. MJERENJE TEMPERATURE HOMOGENIM TERMOPAROM	6
2.1. Strujni krug termopara i izrazi za računanje termonapona	6
2.2. Temperatura hladnog kraja homogenog termopara	7
2.2.1. Temperatura hladnog kraja termopara iznosi 0 °C	7
2.2.2. Temperatura hladnog kraja termopara ne iznosi 0 °C	8
3. NEHOMOGENOST TERMOPARA	10
3.1. Definiranje nehomogenosti kod termoparova	10
3.2. Izvori nehomogenosti termoparova	11
3.3. Utjecaj nehomogenosti pri umjeravanju termopara	11
3.4. Mjerna nesigurnost zbog nehomogenosti	12
3.5. Ispitivanje nehomogenosti termopara	13
4. OPIS ODABRANE METODE ISPITIVANJA NEHOMOGENOSTI, APARATURE I PROVEDENOG POSTUPKA MJERENJA	14
4.1. Ispitivanje nehomogenosti termopara testom izranjanja	14
4.2. Ispitivanje nehomogenosti dva termopara tipa E	14
4.2.1. Aparatura i opis postupka	14
4.3. Ispitivanje dva termopara tipa S i dva termopara tipa K	17
4.3.1. Aparatura i opis postupka	17
5. PRIKAZ I ANALIZA REZULTATA	21
5.1. Prikaz prosječne temperature po pomaku i izračun nehomogenosti pri temperaturi od 180 °C	21
5.1.1. E tipovi termoparova	24
5.1.2. S tipovi termoparova	24
5.1.3. K tipovi termoparova	25
5.2. Prikaz nehomogenosti i mjerne nesigurnosti u rasponu temperatura od 150 °C do 1100 °C	25
5.2.1. E tipovi termoparova	27

5.2.1.1.	E ₁ termopar.....	27
5.2.1.2.	Numerički primjer određivanja vrijednosti u tablici upotrebom formula za E ₁ termopar pri temperaturi od 150 °C	27
5.2.1.3.	E ₂ termopar	29
5.2.2.	S tipovi termoparova	30
5.2.2.1.	S ₁ termopar.....	30
5.2.2.2.	S ₂ termopar.....	31
5.3.1.	K tipovi termopara	32
5.3.1.1.	K ₁ termopar	32
5.3.1.2.	K ₂ termopar	33
5.3.	Analiza nehomogenosti i mjerne nesigurnosti u rasponu temperatura od 150 °C do 1100 °C.....	33
5.3.1.	E tipovi termoparova.....	33
5.3.2.	S tipovi termoparova	34
5.3.3.	K tipovi termoparova	34
6.	ZAKLJUČAK.....	36

POPIS SLIKA

Slika 1.	Ovisnost termoelektromotorne sile o temperaturi.....	1
Slika 2.	Nelinearna karakteristika termoparova.....	2
Slika 3.	Spoj termoparskog osjetnika temperature na voltmetar	3
Slika 4.	Različiti tipovi termoparova	4
Slika 5.	Gibanje elektrona s toplijeg dijela vodiča prema hladnijem	5
Slika 6.	Prikaz strujnog kruga termopara	6
Slika 7.	Temperatura hladnog kraja termopara nije na temperaturi od 0 °C.....	8
Slika 8.	Segment s različitim Seebeckovim koeficijentom u odnosu na ostale segmente termopara	10
Slika 9.	Različite dubine uranjanja termopara pri njegovoj upotrebi	12
Slika 10.	S lijeva nadesno - tračni metar, dva termopara tipa E u keramičkoj cijevi osigurana metalnom kvačicom, uronjena u radni medij kupke	15
Slika 11.	Multiplesor na koji su spojene dvije termoparske žice	16
Slika 12.	Multimetar	16
Slika 13.	Računalo (lijevo) i multimetar (desno).....	17
Slika 14.	Dva termopara tipa S (crni i crveni) i termopar tip K (zeleni) se nalaze odvojeni u svojoj keramičkoj cijevi, dok je preostali termopar tipa K (crni) uloženi u zasebnu keramičku cijev. Sve keramičke cijevi su metalnim kvačicama fiksirane u potrebne položaje.	18
Slika 15.	Hladni krajevi termoparova pri temperaturi od 0 °C.....	19
Slika 16.	Multimetar	19
Slika 17.	Slijeva nadesno – multimetar, hladni krajevi termoparova, računalo	20
Slika 18.	Ovisnost prosječne izmjerene temperature o pomaku za termopar E ₁	21
Slika 19.	Ovisnost prosječne izmjerene temperature o pomaku za termopar E ₂	22
Slika 20.	Ovisnost prosječne izmjerene temperature o pomaku za termopar S ₁	22
Slika 21.	Ovisnost prosječne izmjerene temperature o pomaku za termopar S ₂	23
Slika 22.	Ovisnost prosječne izmjerene temperature o pomaku za termopar K ₁	23
Slika 23.	Ovisnost prosječne izmjerene temperature o pomaku za termopar K ₂	24

POPIS TABLICA

Tablica 1. Sistematika termoparova	3
Tablica 2: Podaci potrebni za izračun nehomogenosti i nesigurnosti za E_1 termopar	27
Tablica 3: Prikaz nesigurnosti zbog nehomogenosti i nehomogenosti u zadanom temperaturnom intervalu za E_1 termopar	27
Tablica 4: Podaci potrebni za izračun nehomogenosti i nesigurnosti za E_2 termopar	29
Tablica 5: Prikaz nesigurnosti zbog nehomogenosti i nehomogenosti u zadanom temperaturnom intervalu za E_2 termopar	29
Tablica 6: Podaci potrebni za izračun nehomogenosti i nesigurnosti za S_1 termopar	30
Tablica 7: Prikaz nesigurnosti zbog nehomogenosti i nehomogenosti u zadanom temperaturnom intervalu za S_1 termopar	30
Tablica 8: Podaci potrebni za izračun nehomogenosti i nesigurnosti za S_2 termopar	31
Tablica 9: Prikaz nesigurnosti zbog nehomogenosti i nehomogenosti u zadanom temperaturnom intervalu za S_2 termopar	31
Tablica 10: Podaci potrebni za izračun nehomogenosti i nesigurnosti za K_1 termopar	32
Tablica 11: Prikaz nesigurnosti zbog nehomogenosti i nehomogenosti u zadanom temperaturnom intervalu za K_1 termopar	32
Tablica 12: Podaci potrebni za izračun nehomogenosti i nesigurnosti za K_2 termopar	33
Tablica 13: Prikaz nesigurnosti zbog nehomogenosti i nehomogenosti u zadanom temperaturnom intervalu za K_2 termopar	33

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
t	°C	Temperatura
$E(t)$	mV	Napon pri temperaturi t
$s(t)$	mV/°C	Seebeckov koeficijent pri temperaturi t
u	°C	Mjerna nesigurnost zbog nehomogenosti

SAŽETAK

Termoparovi su uređaji koji se koriste za mjerenje temperature. Standardizirani su s obzirom na materijale koji tvore termoparske žice. Pritom, tipovi termoparova koji su najčešće u upotrebi su E, S, K, R, J i T. Primjenjivi su u širokom rasponu temperatura te su pogodni za mjerenja brzih promjena temperature. Termoparovi rade na principu termoelektričnog efekta koji se zove Seebeckov efekt koji omogućava da se zbog postojanja temperaturnog gradijenta duž termoparske žice inducira napon. Ovaj napon je moguće izmjeriti te ga pomoću usporedbenih tablica ili polinoma višeg stupnja pretvoriti u temperaturu. Generirani napon homogenog termopara ovisi samo o temperaturama krajeva termopara, dok je kod nehomogenog termopara on suma svih generiranih napona na svim neizotermalnim dijelovima žica. Kao posljedica ovoga, temperatura izmjerena nehomogenim termoparom odstupat će od stvarne temperature za određeni iznos. Nehomogenost je karakteristika termopara koja nastaje uslijed mehaničkih ili kemijskih oštećenja. Kako bi se odredio utjecaj nehomogenosti termopara, potrebno je provesti ispitivanje nehomogenosti.

Ključne riječi: termopar, Seebeckov efekt, napon, temperatura, homogeni termopar, nehomogeni termopar, ispitivanje nehomogenosti

SUMMARY

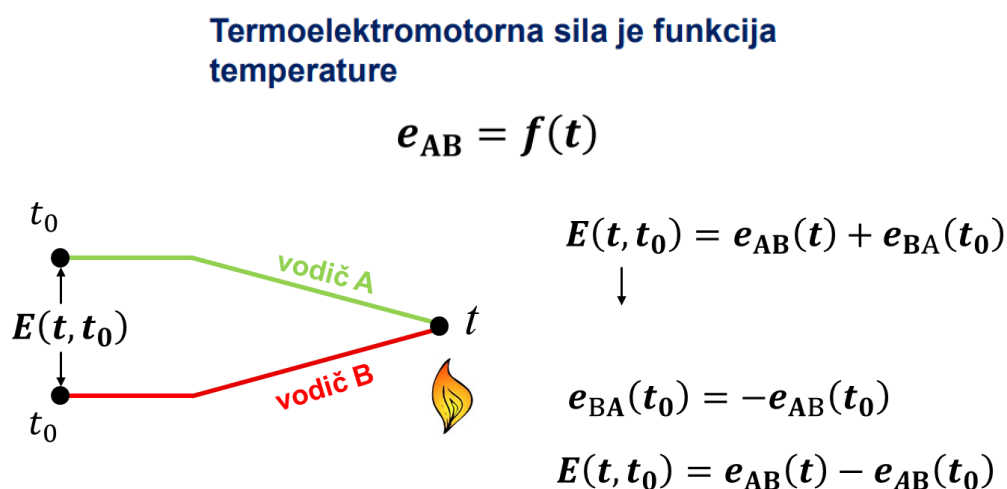
Thermocouples are devices used for temperature measurement. They are standardized with respect to the materials that make up the thermocouple wires. In addition, the types of thermocouple wires that are most often used are E, S, K, R, J and T. They are applicable in a wide range of temperatures and are suitable for measuring quick temperature changes. Thermocouples work on the principle of a thermoelectric effect called the Seebeck effect, which allows voltage to be induced due to the existence of a temperature gradient along the thermocouple wire. This voltage can be measured and converted to temperature using reference tables or higher degree polynomials. The generated voltage of a homogeneous thermocouple depends only on the temperatures of the ends of the thermocouple. The generated voltage of an inhomogeneous thermocouple is the sum of all generated voltages on all non-thermal parts of the wires. Therefore, the temperature measured by the inhomogeneous thermocouple will deviate from the actual temperature by a certain amount. Inhomogeneity is a characteristic of thermocouples that occurs due to mechanical or chemical damage. In order to determine the influence of thermocouple inhomogeneity, it is necessary to perform an inhomogeneity test.

Key words: thermocouples, Seebeck effect, voltage, temperature, homogeneous thermocouple, inhomogeneous thermocouple, inhomogeneity test

1. UVOD

1.1. Termoparovi

Termoparovi su uređaji koji se koriste kao osjetnici temperature te su među najčešće korištenim osjetnicima u različitim područjima primjene. Pod pojmom termopar podrazumijevaju se dvije metalne žice, odnosno vodiči međusobno spojeni na jednom kraju (primjerice zavarom) dok su na drugom kraju slobodni. Mjerenje temperature termoparom omogućuju interakcije među električnim i termalnim ponašanjem elektrona metalnog vodiča, što se naziva termoelektričnim efektom. Ovaj efekt je istraživao i njemački znanstvenik Thomas Johann Seebeck. Na temelju njegovog otkrića 1821. godine, osmišljen je uređaj koji bi se mogao koristiti za mjerenje temperature. Seebeckov efekt, termoelektrični efekt nazvan u čast njemačkog znanstvenika, opisuje pojavu kod koje zagrijavanjem termopara na mjestu spoja vodiča, dolazi do generiranja električnog napona između slobodnih krajeva vodiča. Mjerenjem ovog napona, odnosno termoelektromotorne sile moguće je izračunati temperaturu na mjestu spoja termoparskih žica pomoću jednadžbi koje su karakteristične za svaku vrstu termopara [slika 1].

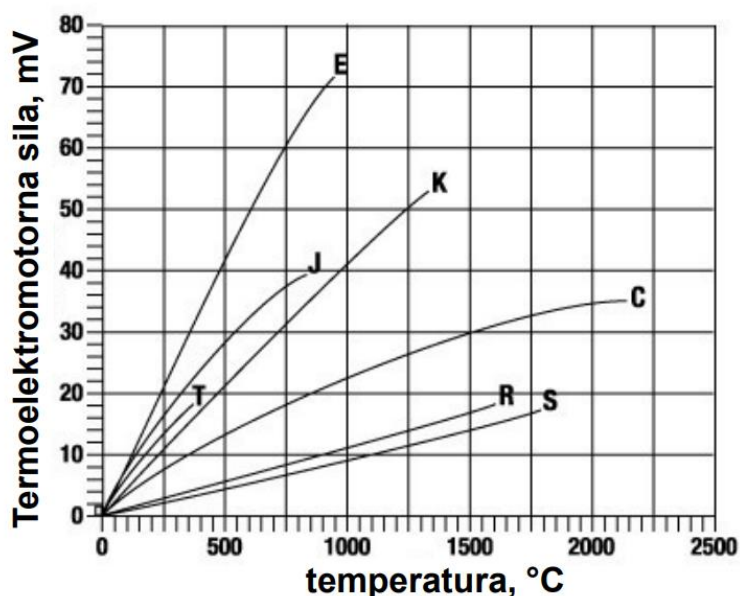


Slika 1. Ovisnost termoelektromotorne sile o temperaturi

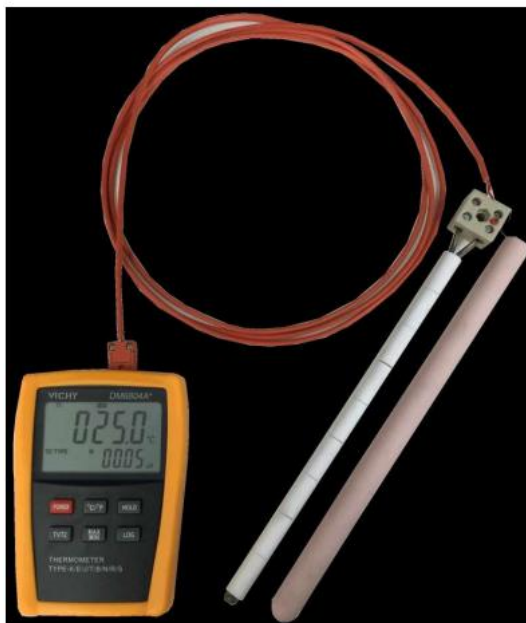
1.2. Prednosti i nedostaci termoparova

U moderno doba, postoje različiti načini mjerenja temperature pomoću instrumenata koji funkcioniraju na različitim principima. Pirometri, instrumenti koji se koriste za beskontaktno mjerenje temperature, a baziraju se na mjerenju intenziteta elektromagnetskog zračenja tijela, možda prvo padaju na pamet. S druge strane, postoje različite vrste kontaktnih mjerila

temperature. Otpornički termometri, koji funkcioniraju koristeći pojavu da se otpor metalnih vodiča mijenja s promjenom temperature, trenutno se smatraju najtočnijim mjerilima temperature. Stoga se nameće pitanje, zašto se termoparovi koriste u toliko raširenoj upotrebi? Od industrije, preko kućanstva pa sve do upotrebe u avijaciji i svemirskoj tehnologiji, termoparove karakterizira niz prednosti. Lako ih je proizvesti, jednostavni su za korištenje te su relativno jeftini. Nadalje, različite tipove termoparova moguće je koristiti za mjerenja u širokim temperaturnim rasponima (do 2600 °C). Također su dobar izbor pri mjerenju brzih promjena temperatura, s obzirom na to da mogu imati mali toplinski kapacitet. Njihova upotreba je standardizirana, što znači da postoje točno propisani metali koji mogu tvoriti dvije termoparske žice. S druge strane, termoparovi nisu idealni mjerni instrumenti. Usprkos svemu navedenom, točnost mjerenja termoparom je rijetko veća od ± 1 °C. Nelinearna karakteristika [slika 2] termoparova otežava prosudbu promjene napona s temperaturom bez upotrebe računala. Osim toga, mjerenje temperature termoparovima zahtjeva poznavanje usporedbene temperature, odnosno temperature priključaka termoparskih žica na bakrene žice milivoltmetra. Usporedbena temperatura se najčešće ostvaruje uranjanjem spojeva termoparskih žica na bakrene žice u mješavinu leda i vode ili se mjeri pomoću dodatnog osjetnika koji nije termoparski. Na kraju, generirani napon je u pravilu vrlo nizak, na razini nekoliko milivolta (mV), pa su stoga potrebni precizni instrumenti za njegovo mjerenje [slika 3].



Slika 2. Nelinearna karakteristika termoparova



Slika 3. Spoj termoparskog osjetnika temperature na voltmetar

1.3. Tipovi termoparova

Uobičajni načini ostvarivanja spoja termoparskih žica su kliještima, lemljenjem, zavarivanjem ili laserom. Za električku izolaciju metalnih vodiča često se upotrebljavaju guma, papir, lak ili keramičke izolacijske cjevčice.

Termoparovi su standardizirani prema materijalima od kojih su napravljeni metalni vodiči (žice) [slika 4].

Tipovi termopara koji su najviše u upotrebi su K, T, J, R, S i E.

U tablici 1 su prikazani tipovi termoparova, nazivi prema materijalima od kojih su napravljeni vodiči te područje primjene izražene u stupnjevima Celzijevih.

Tablica 1. Sistematika termoparova

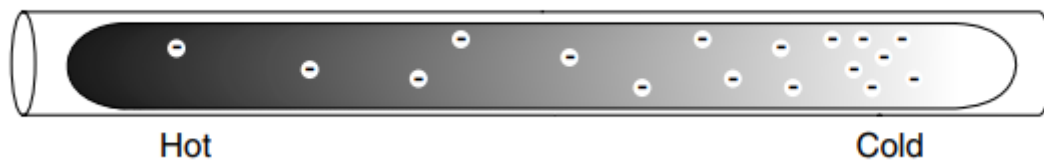
Tip (slovna oznaka)	Naziv		Područje primjene °C
K	Nikal – Krom Nikal	Ni – Cr/Ni	-200 do 1260
T	Bakar Konstantan	Cu/konst	-200 do 371
J	Željezo Konstantan	Fe/konst	0 do 760
R S	Platina – Rodij Platina	Pt – Rd/Pt	0 do 1480
E	Nikal – Krom Konstantan	Ni – Cr/konst	-200 do 900



Slika 4. Različiti tipovi termoparova

1.4. Seebeckov efekt

Svojstva svakog metala određuju pretežito elektroni svojim neprekidnim gibanjem. Primjerice, kod izoternog metalnog vodiča elektroni se neprestano gibaju između svoja dva slobodna kraja. Ukupna energija elektrona se sastoji od kinetičke i električne potencijalne energije. Jedan od načina povećanja kinetičke energije elektrona je izlaganje metala toplini. Kada bi se jedan kraj izoternog metalnog vodiča izložio toplini, elektronima koji se nalaze uz grijani dio vodiča povećala bi se kinetička energija. Kao posljedica ovoga, elektroni s toplog kraja će se još intenzivnije kretati prema području manje energetske razine, odnosno prema hladnijem dijelu vodiča [slika 5]. Istovremeno, elektroni s hladnijeg dijela vodiča se gibaju prema toplijem dijelu. Međutim, ovo se odvija dosta sporije zbog manje kinetičke energije hladnijih elektrona. Zbog toga će se na hladnom dijelu vodiča naći više elektrona nego na toplom. Pritom dolazi i do difuzije, odnosno miješanja elektrona. Pojava viška elektrona na hladnom dijelu vodiča u odnosu na topli, rezultira stvaranjem razlike potencijala duž vodiča, odnosno pojavom napona. Ovaj specifičan termoelektrični efekt, nastao zbog postojanja temperaturnog gradijenta duž vodiča, naziva se Seebeckovim efektom. Generirani napon se analogno tome naziva Seebeckovim naponom ili termonaponom.



Slika 5. Gibanje elektrona s toplijeg dijela vodiča prema hladnijem

Mjerenje temperature termoparom je moguće upravo zbog ovog efekta. Jednadžba koja povezuje Seebeckov napon i temperaturu kod homogenog vodiča, dana je izrazom (1):

$$E(t) = \int_{t_1}^{t_2} s(t) dt \quad (1)$$

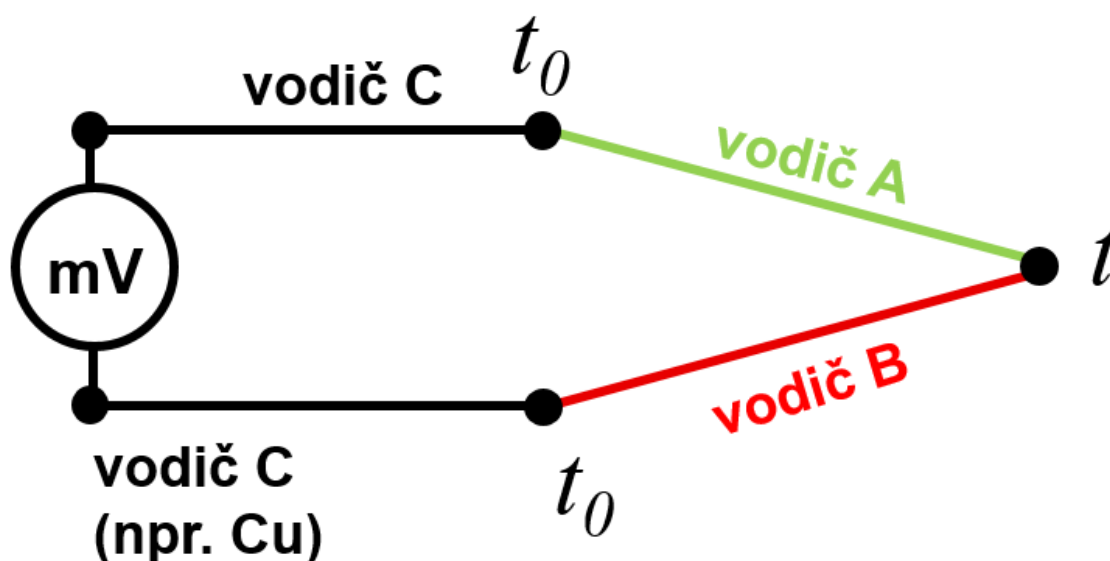
$E(t)$ je termonapon koji se mjeri termoparom, t_1 i t_2 su temperature krajeva termopara, pri čemu se $s(T)$ naziva Seebeckovim koeficijentom. Na Seebeckov koeficijent utječu promjene svojstava termoparskih žica uslijed mehaničkih ili kemijskih oštećenja. Ako je Seebeckov koeficijent uvijek isti duž termoparske žice, govorimo o homogenom vodiču.

Nehomogenost podrazumijeva različite vrijednosti Seebeckovog koeficijenta duž termoparske žice. Ako žica ima oštećenja na mjestima gdje postoji temperaturni gradijent, najčešće dolazi do promjene Seebeckovih koeficijenata na svakom od tih mjesta. Ovo rezultira razlikom generiranog termonapona u odnosu na napon koji se pri određenoj temperaturi očekuje za određeni tip termoparskog osjetnika, što uzrokuje pogrešku pri mjerenju temperature. Oštećena termoparska žica na mjestima gdje je termopar izoterman ne utječe na promjenu generiranog termonapona jer se bez postojanja temperaturnog gradijenta ne može generirati termonapon.

2. MJERENJE TEMPERATURE HOMOGENIM TERMOPAROM

2.1. Strujni krug termopara i izrazi za računanje termonapona

Kao što je ranije spomenuto, isti Seebeckov koeficijent duž vodiča karakterizira homogeni termopar. U tom je slučaju generirani termonapon ovisan jedino o temperaturama na krajevima termopara t i t_0 . Za slučaj da je Seebeckov koeficijent konstantan duž vodiča, generirani termonapon je ovisan samo o razlikama temperatura na krajevima termopara t i t_0 . Ako ne postoji temperaturni gradijent, odnosno ako je vodič izotermalan (temperatura t i t_0 su jednake), neće se generirati termonapon.



Slika 6. Prikaz strujnog kruga termopara

Slika 6. prikazuje strujni krug koji se sastoji od vodiča A, vodiča B, vodiča C i voltmetra. Spoj vodiča A i B je na temperaturi t . Vodiči A i B se spajaju na vodič C, gdje je temperatura tih dvaju spojeva t_0 . Preko vodiča C se mjeri napon pomoću voltmetra. Vodiči A i B su vodiči različitih metalnih materijala ili legura, dok je vodič C u praksi najčešće napravljen od bakra. Iako je u uvodu spomenuto da se termopar sastoji od dvije termoparske žice, odnosno dva vodiča, u nastavku će biti pokazano da dodavanje trećeg vodiča u strujni krug neće imati utjecaj na generirani napon. Ovo će vrijediti samo onda kada se spojevi vodiča A s vodičem C nalaze na istoj temperaturi (t_0) kao i spojevi vodiča B s vodičem C.

Kako bi se osiguralo da se termoparom doista određuje napon ovisan o temperaturama krajeva termopara t i t_0 , područja oko komponenti strujnog kruga čija se termoelektrična svojstva ne mogu odrediti ili se teško kontroliraju moraju biti izotermalna. U te komponente se ubrajaju

spoj dvije termoparske žice A i B, područje oko trećeg vodiča (spoja A i C te spoja B i C) i voltmetar, koji je najčešće i najsloženiji dio strujnog kruga. Ovo znači da na spomenutim mjestima ne smije postojati temperaturni gradijent koji bi generirao napon. Uzevši u obzir ove pretpostavke, vrijedi sljedeći zapis:

$$E = E_A(t) - E_A(t_0) + E_C(t_0) - E_C(t) + E_B(t_0) - E_B(t) \quad (2)$$

Iz ovog zapisa je vidljivo da vodič C ne utječe na generirani napon.

Zatim, uobičajno je da se razlika napona između vodiča A i B na istoj temperaturi, zamijeni relativnim Seebeckovim naponom E_{AB} . Stoga vrijedi:

$$E_A(t) - E_B(t) = e_{AB}(t) \quad (3)$$

$$E_A(t_0) - E_B(t_0) = e_{AB}(t_0) \quad (4)$$

Uvrštavanjem jednadžbi (3) i (4) u (2), dobiva se konačan izraz za generirani napon:

$$E = E_{AB}(t) - E_{AB}(t_0) \quad (5)$$

Mjerenja pomoću termopara se provode na način da se želi odrediti temperatura t , dok je temperatura t_0 poznata, baš kao i materijali vodiča A i B. Nakon što je voltmetrom određena vrijednost termonapona, potrebno je pronaći izmjereni termonapon u usporedbenim tablicama ovisno o materijalu termopara te tamo očitati temperaturu koja odgovara izmjerenom termonaponu. Očitana temperatura predstavlja traženu temperaturu t . Vrijedi napomenuti da su u pravilu usporedbene tablice izrađene na način da je temperatura hladnog kraja termopara, temperatura t_0 , postavljena na $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Drugi način pretvorbe napona u temperaturu je modeliranjem preko polinoma višeg stupnja.

2.2. Temperatura hladnog kraja homogenog termopara

Pod hladnim krajem termopara podrazumijevamo spojeve termoparskih žica A i B s vodičem C, čije su temperature na slici 6 označene s t_0 .

2.2.1. Temperatura hladnog kraja termopara iznosi $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

Postavljanjem hladnog kraja termopara na $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ omogućuje jednostavniju pretvorbu termonapona u temperaturu jer tada vrijedi da je $E(0\text{ }^{\circ}\text{C}) = 0$. Stoga, jednadžba (5) se transformira u:

$$E = E_{AB}(t) \quad (6)$$

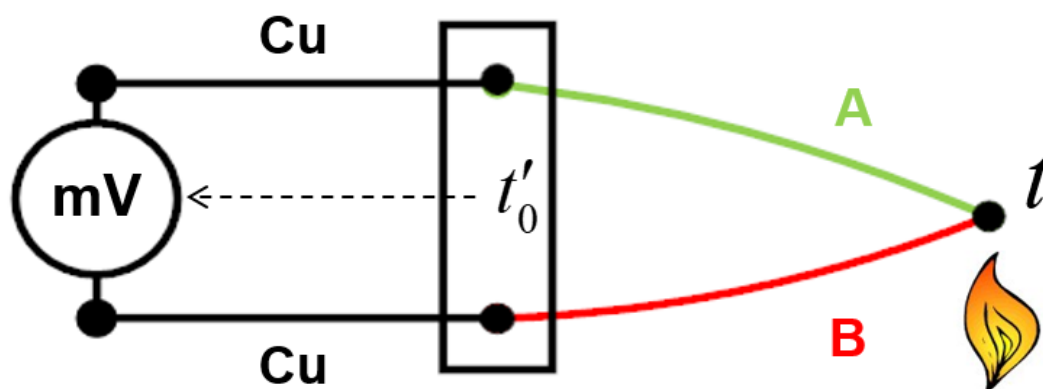
Nakon što je napon izmjeren pomoću voltmetra, potrebno je pretvoriti očitani iznos napona u temperaturu pomoću usporedbenih tablica ili jednadžbi.

$0\text{ }^{\circ}\text{C}$ je temperatura koju je najlakše ostvariti u laboratorijskim uvjetima te je zbog toga ona najčešće odabrana kao temperatura hladnog kraja. Također, ona je uzeta kao temperatura hladnog kraja pri izradi usporedbenih tablica.

U praksi, za manji broj termoparova u istovremenoj upotrebi, koristi se isključivo mješavina leda i vode kao sredstvo za postizanje tražene temperature. Svježi led bi se trebao dobavljati na mjesto spoja kod hladnog kraja pri dugotrajnim mjerenjima. U tom slučaju, preporučljivo je povremeno promiješati mješavinu te pažljivo motriti temperaturu iste pomoću drugog mjerila temperature. Nadalje, treba obratiti i pozornost na mogućnost korozije spoja kod hladnog kraja termometra pri dugotrajnim mjerenjima.

2.2.2. Temperatura hladnog kraja termopara ne iznosi $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

Temperatura hladnog kraja termopara od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ predstavlja veliku prednost pri pretvorbi napona termopara u temperaturu te se zbog toga smatra i najtočnijom metodom mjerenja temperature termoparom. Međutim, pri radu na terenu ili na mjestima gdje upotreba leda i vode nije praktična ili uopće moguća, temperatura hladnog kraja neće iznositi $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Stoga je potrebno napraviti korekciju, odnosno kompenzirati razliku temperature između stvarne temperature spoja kod hladnog kraja i usporedbene temperature od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Opet, temperatura hladnog kraja termopara, koju ćemo označiti u ovom slučaju t'_0 , mora biti poznata kako bi se mogla odrediti temperatura toplog kraja t (mjesto spoja termoparskih žica) [slika 7].



Slika 7. Temperatura hladnog kraja termopara nije na temperaturi od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

Usvojiti ćemo pretpostavku da je temperatura $t'_0 > t_0$ te će se ranije usvojene jednadžbe (3) i (4) analogno primijeniti ovdje.

Stoga vrijedi:

$$E(t, t_0) - E(t, t'_0) = E_{AB}(t) - E_{AB}(t_0) - [E_{AB}(t) - E_{AB}(t'_0)] \quad (7)$$

$$E(t, t_0) - E(t, t'_0) = E_{AB}(t'_0) - E_{AB}(t_0) \quad (8)$$

$$E(t, t_0) - E(t, t'_0) = E(t'_0, t_0) \quad (9)$$

$$E(t, t_0) = E(t'_0, t_0) + E(t, t'_0) \quad (10)$$

Postupak određivanja temperature termoparom kod kojeg hladni kraj nije na 0 °C se sastoji od toga da se prvo voltmetrom izmjeri napon $E(t, t'_0)$. Također, potrebno je izmjeriti temperaturu hladnog kraja termopara t'_0 . Nakon toga se iz usporedbenih tablica za zadani termopar (poznati su materijali žica A i B sa slike 7) očita napon $E(t'_0, t_0)$. Ovaj napon u konačnici predstavlja kompenzaciju napona koja se mora dodati izmjerenom kako bi se mogle koristiti usporedbene tablice koje su napravljene postavljajući hladni kraj na temperaturu 0 °C. Potom se pomoću formule (10) izračuna napon $E(t, t_0)$ te se iz usporedbene tablice na temelju tog napona odredi temperatura t .

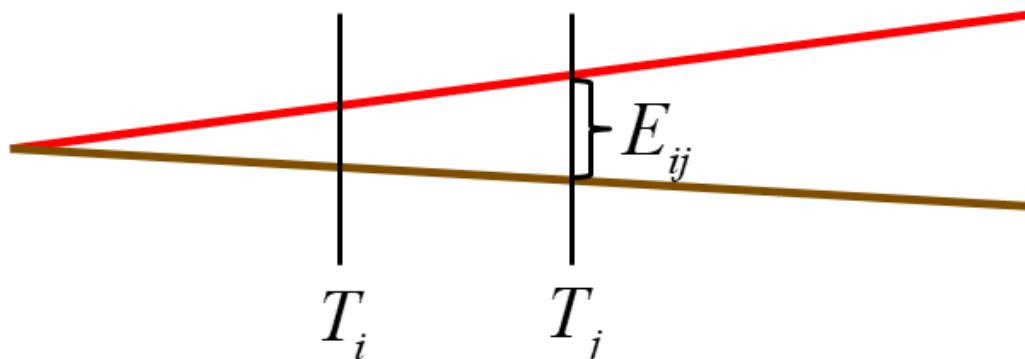
Moguća greška prilikom određivanja temperature ovim postupkom se sastoji u tome da se spomenuta kompenzacija zapravo računski uvijek mora odvijati u terminima napona.

3. NEHOMOGENOST TERMOPARA

3.1. Definiranje nehomogenosti kod termoparova

Homogenost termopara se veže uz nepromjenjivost Seebeckovog koeficijenta duž termoparske žice. Generirani termonapon kod homogenog vodiča ovisi samo o temperaturama toplog i hladnog kraja termopara.

Sukladno tome, potrebno je razmotriti i slučaj kada Seebeckov koeficijent nije uvijek isti duž termoparske žice. Termopar kod kojeg je to slučaj naziva se nehomogenim termoparom. Nehomogenost kod termopara se definira kao abnormalna promjena Seebeckovog koeficijenta duž termopara. Odnosno, termonapon više ne ovisi samo o temperaturama slobodnih krajeva termopara, već se generira svugdje duž termoparske žice gdje postoji temperaturni gradijent, osim na mjestima gdje je termoparska žica izotermalna. Stoga se termoparska žica dijeli na segmente s različitim Seebeckovim koeficijentima. Pritom se ovdje zapravo govori o prosječnom Seebeckovom koeficijentu za segment termoparskih žica. Ovo znači da je termonapon kojeg pokazuje voltmetar suma svih termonapona na svim neizotermalnim segmentima žica [slika 8].



Slika 8. Segment s različitim Seebeckovim koeficijentom u odnosu na ostale segmente termopara

Jednadžba koja povezuje prosječan Seebeckov koeficijent, razliku temperatura i generiran termonapon, dana je sljedećim izrazom:

$$s(T_m) = \frac{E_{ij}}{T_j - T_i}; \quad (11)$$

pri čemu je T_m prosječna temperatura segmenta termopara, T_j i T_i predstavljaju temperature krajeva segmenta termopara, dok je E_{ij} generirani termonapon na segmentu termopara.

3.2. Izvori nehomogenosti termoparova

Mehanička oštećenja, utjecaj okolne atmosfere i dugotrajna izloženost visokim temperaturama zbog koje dolazi do metalurških promjena najčešći su izvori nehomogenosti termopara jer uzrokuju promjene lokalnog Seebeckovog koeficijenta.

Pod mehanička oštećenja termopara podrazumijevaju se savijanje, uvijanje ili promjena promjera žice. Ova oštećenja mogu izazvati promjenu Seebeckovog koeficijenta od 4% za temperature ispod 400 °C kod termopara tipa K.

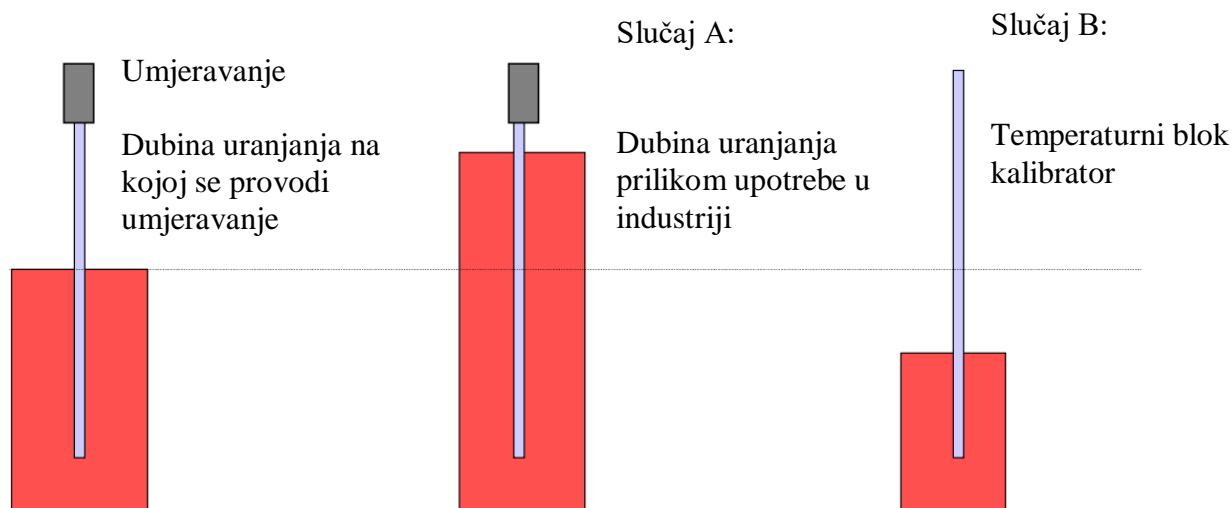
U kemijska oštećenja termopara spada utjecaj okolne atmosfere na termopar. Ovdje zapravo problem leži u reakciji izolacijskoj materijala kojim je obložen termopar u reducirajućoj atmosferi. Pri izloženosti visokoj temperaturi u reducirajućoj atmosferi, dolazi do oslobađanja metalnih iona atoma magnezija, silicija, borovog nitrida i aluminija koji nepovoljno utječu na strukturu termopara te ga oštećuju. Osim toga, na neke vrste termoparova negativno utječe okolna atmosfera sa smanjenim udjelom kisika. Kod termopara tipa K ova pojava može rezultirati smanjenjem Seebeckovog koeficijenta od čak 30%.

Metali od kojih je pak izrađen termopar mogu se naći u različitim fazama ili kristalnim strukturama u ovisnosti o temperaturama kojima je termopar bio izložen tijekom korištenja. Porastom temperature, metali mijenjaju svoju strukturu u onu koja se nalazi na najmanjoj energetske vrijednosti pri zadanoj temperaturi. Pritom, svaka struktura ima najčešće različit Seebeckov koeficijent što u konačnici uzrokuje nehomogenost termopara.

3.3. Utjecaj nehomogenosti pri umjeravanju termopara

Kako bi se osiguralo da rezultat mjerenja ili vrijednost nekog etalona bude u skladu s referentnim etalom, potrebno je provesti lanac usporedbi, čime se osigurava mjeriteljska sljedivost. Ovdje riječ etalon označava mjeru, mjerilo ili sustav koji ima unaprijed određen odnos prema mjernoj jedinici neke fizikalne veličine. Proces pomoću kojeg se ove usporedbe provode naziva se umjeravanje te se postiže izravnom usporedbom s etalonima ili potvrđenim referentnim tvarima. Termopar, koji ovdje označava mjerilo temperature, mora se umjeravati u propisanom periodu kako bi se mogla jamčiti točnost očitavanja mjerila, pouzdanost mjerila i sukladnost očitavanja s drugim provedenim mjerenjima. Umjeravanje termopara se provodi metodom usporedbe s drugim referentnim termoparom na način da se oba termopara postave u zonu kontrolirane temperature te im se uspoređuju očitavanja. Zona kontrolirane temperature označava područje malih temperaturnih gradijenata te malih promjena temperature u vremenu. Primjer ovakve zone je radna kapljevinna grijana pri konstantnoj temperaturi (izopentan, etanol, voda, ulje).

Problem s umjeravanjem termopara nastaje kada je on nehomogen. Umjeravanje se najčešće odvija samo na jednoj razini uronjenosti termopara (nema promjene položaja termopara po dubini kapljevine) [slika 9]. Stoga, ako je termopar nehomogen na nekom svom izotermalnom dijelu, postoji realna mogućnost da se nehomogenost pri umjeravanju neće otkriti.



Slika 9. Različite dubine uranjanja termopara pri njegovoj upotrebi

3.4. Mjerna nesigurnost zbog nehomogenosti

Prilikom mjerenja temperature pomoću termopara uobičajena je uporaba već korištenih termopara umjesto kupovine novog termopara za svako novo mjerenje. Takvi termoparovi su potencijalno nehomogeni na nekom svom segmentu, iako niti novi termoparovi nisu nužno imuni na ovakvu pojavu, najčešće zbog nastanka mehaničkih oštećenja prilikom strojne obrade metala žice (izvlačenjem).

Međutim, termoparovi, iako nehomogeni, također mogu biti dovoljno dobar izbor pri mjerenju temperature. Proces mjerenja temperature termoparom sam po sebi nema smisla bez procjene kvalitete ili valjanosti rezultata. Procjena kvalitete rezultata provodi se između ostalog, pomoću procjene mjerne nesigurnosti. Mjerna nesigurnost odražava nedostatak znanja točne vrijednosti mjerene veličine. Postoje različiti izvori mjerne nesigurnosti. Na mjernu nesigurnost mogu utjecati okolina, mjeritelj, objekt mjerenja, mjerni instrument, uzrokovanje ili postupak. Pri mjerenju temperature termoparom uobičajeno se provodi analiza mjerne nesigurnosti zbog nehomogenosti termopara. Dva parametra za kvantificiranje mjerne nesigurnosti su širina intervala nesigurnosti i razina pouzdanosti.

Primjerice, izmjerena temperatura pomoću termopara iznosi $100\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ na razini pouzdanosti od 95%. Ovo znači da se može reći da je za izmjerenu temperaturu od 100 °C , 95% sigurno da je stvarna mjerena vrijednost te temperature u intervalu od 95 do 105 °C .

Spoznajući ovakav rezultat mjerenja, ocjena daljnjeg rukovanja termoparom ovisi u njegovoj namjeni. Ako se ovaj termopar koristi, na primjer, u kućanstvu pri mjerenju temperature vode za pripremu kave, ovaj rezultat može biti sasvim zadovoljavajući. S druge strane, ako bi se ovaj termopar koristio u industriji, gdje se teži za što manjim širinama intervala nesigurnosti, mogao bi biti odbačen kao nedovoljno precizan mjerni instrument.

3.5. Ispitivanje nehomogenosti termopara

Kako bi bilo moguće raspolagati termoparom u širokom rasponu temperatura pri različitim zahtjevima, potrebno je provesti ispitivanje nehomogenosti termopara. Ispitivanjem nehomogenosti termopara dobiva se uvid u stvarnu razinu utjecaja nehomogenosti pri mjerenju temperature.

Dvije najčešće vrste ispitivanja su ispitivanje dvama temperaturnim gradijentima i ispitivanje uranjanjem ili izranjanjem termopara.

Ispitivanje dvama temperaturnim gradijentima se provodi tako da se dva izvora topline pomiču u suprotnim smjerovima duž termoparske žice, dok je temperatura krajeva termopara na konstantnoj temperaturi. Generirani napon na krajevima žice je zapravo razlika napona koji se generira pomoću dva temperaturna gradijenta. Kod homogenog termopara, ta dva generirana napona se poništavaju i generirani napon je opet ovisan samo o temperaturama krajeva termopara.

Druga metoda ispitivanja nehomogenosti termopara je ona postepenim uranjanjem ili izranjanjem dijelova termopara u medij velike temperaturne stabilnosti, odnosno, u medij koji je po presjeku izotermalan u aksijalnom smjeru. Dakle, dio termoparske žice se u početnom položaju nalazi iznad, a dio ispod površine spomenutog medija. Primjer takvog ispitivanja je postepeno izranjanje segmenata termopara iz kupke grijane pri konstantnoj temperaturi, te se ona smatra izotermalnom u svom aksijalnom smjeru. Iako je dio termoparske žice iznad površine kupke izložen zraku sobne temperature, dijelovi žice se ne nalaze na toj istoj temperaturi zbog provođenja topline kroz žicu. Dovoljnim udaljavanjem termoparske žice od površine kupke, temperatura žice će sve više padati od temperature kupke prema sobnoj temperaturi. Stoga će napon generirati onaj dio žice koji se nalazi iznad površine kupke jer tamo postoje temperaturni gradijenti. Izvlačenjem dijela termopara iz kupke postiže se promjena segmenta termoparske žice koja generira napon u odnosu na onaj segment koji je bio uronjen prije promjene položaja termopara. Ako se taj napon razlikuje od onog kojeg je generirao dio žice koji se ranije nalazio na toj poziciji, termopar je nehomogen.

4. OPIS ODABRANE METODE ISPITIVANJA NEHOMOGENOSTI, APARATURE I PROVEDENOG POSTUPKA MJERENJA

4.1. Ispitivanje nehomogenosti termopara testom izranjanja

Ispitivanje je provedeno u dva navrata, a uključuje šest različitih termoparova. Prvo su se istovremeno ispitivala dva termopara tipa E a zatim dva tipa S i dva tipa K. Kao medij iz kojeg su se termoparovi izranjali koristilo se ulje u termostatiranoj kupki, čija se temperatura održavala na stalnoj temperaturi od 180 °C. Uljna kupka se odabrala iz razloga što njezina upotreba vrlo precizno zadovoljava uvjet zanemarivih aksijalnih gradijenata temperature u ulju, odnosno nema znatnije promjene temperature po visini stupca ulja. Konzervativno procijenjena standardna nesigurnost ispitivanja nehomogenosti termoparova zbog postojanja aksijalnih temperaturnih gradijenata u uljnoj kupki iznosi 10 mK. Naponi koje je generirao svaki pojedini termopar, pri svakom pomaku tijekom izranjanja, služit će za izračunavanje nehomogenosti i pripadnih mjernih nesigurnosti za svaki pojedini termopar u rasponu temperatura od 150 °C do 1100 °C.

4.2. Ispitivanje nehomogenosti dva termopara tipa E

4.2.1. Aparatura i opis postupka

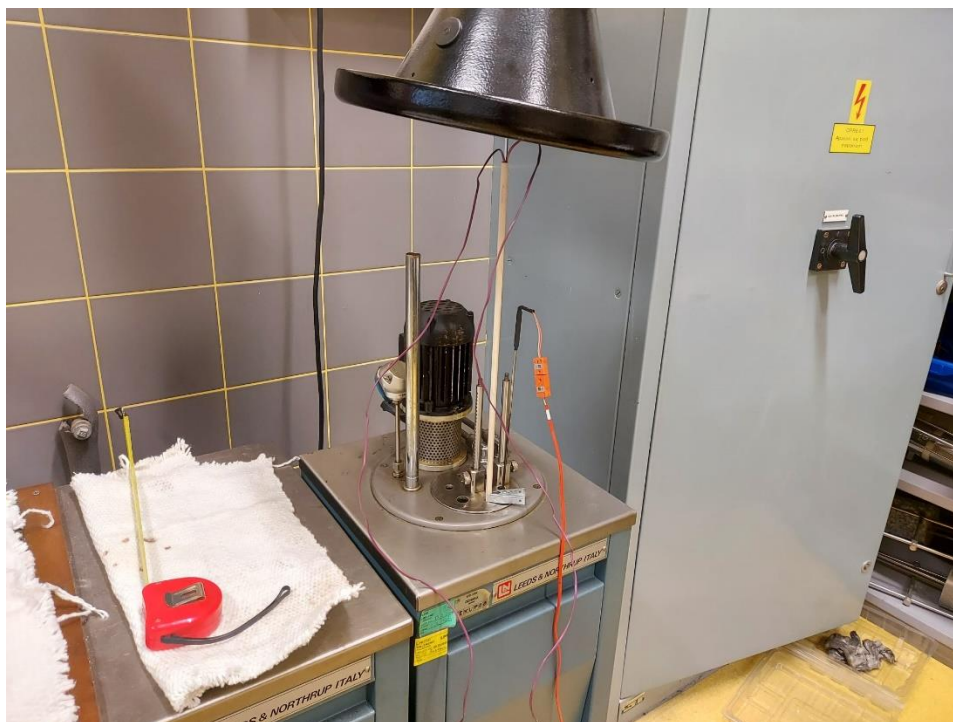
Oba termopara su prvo postavljena u keramičku cijev zatvorenu na njezinom dnu radi lakšeg centriranja i mijenjanja vertikalnog položaja vrhova termoparova u kupki. U početnom položaju, termoparovi su potpuno uronjeni u kupku te je dno keramičke cijevi na dnu kupke. Nepomičnost termoparova u kupki osigurava metalna kvačica postavljena pri samom provrtu za umetanje termoparova na poklopcu kupke. Tračnim metrom su mjereni pomaci od početnog položaja, koji je za oba termopara pri potpunoj uronjenosti termoparova u kupku [slika 10].

Termoparske žice su zatim spojene na multipexor [slika 11]. Multiplexor je spojna kutija na koju je moguće istovremeno spojiti nekoliko termoparskih žica koje su unutar kutije dalje spojene na bakrene vodove koji se nalaze na sobnoj temperaturi od otprilike 25 °C. Ovo ujedno označava i temperaturu hladnog kraja termoparske žice. Temperatura spojeva termoparskih žica na bakrene vodove je mjerena pomoću platinskog otporničkog termometra koji je zajedno s ovim spojevima uronjen u posudicu s pijeskom, čime se ostvaruje nastoje ostvariti dobar međusobni toplinski kontakt i mali temperaturni gradijenti.

Multiplexor je bakrenom žicom spojen na multimeter [slika 12], uređaj koji mjeri generirani termonapon termopara. Multimeter je zatim spojen na računalo [slika 13]. Računalo očitava napone pojedinih termoparova i izračunava pripadne temperature. S obzirom na to da je

temperatura hladnog kraja termopara različita od 0 °C, računalo provodi i potrebnu korekciju temperature na način opisan u potpoglavlju 2.2.2. Nakon toga, na ekranu se iscrtavaju dijagrami promjene temperature u vremenu, istovremeno za oba termopara.

Položaj termoparova se mijenja otprilike svakih deset minuta te se bilježi. Zadnja zabilježena pozicija je na 22 cm udaljenosti od početnog položaja. Ispitivanje se završava, a rezultati se spremaju i analiziraju.



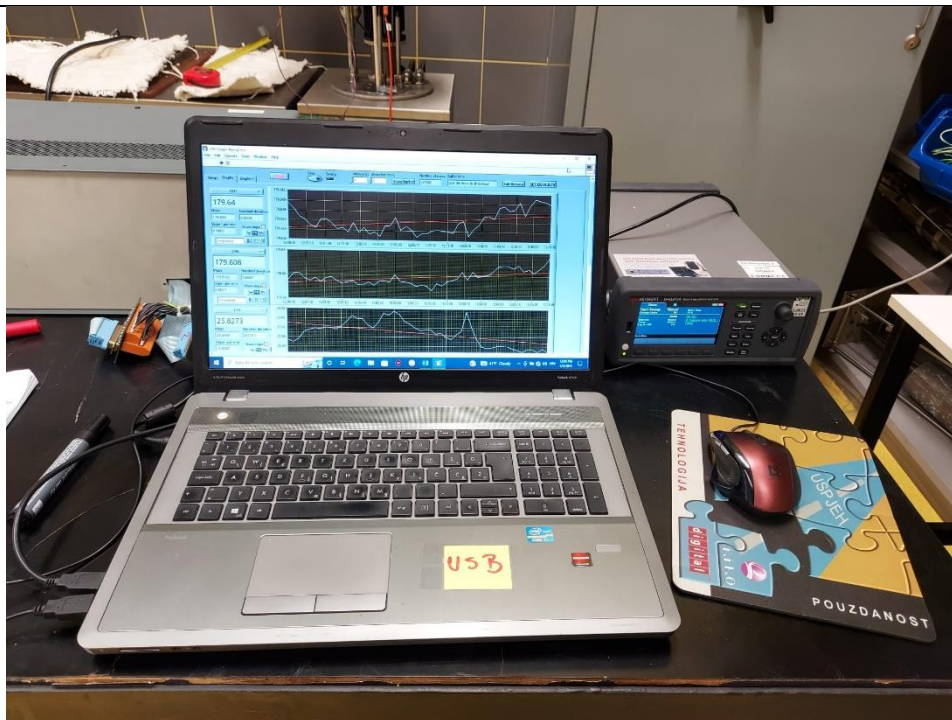
Slika 10. S lijeva nadesno - tračni metar, dva termopara tipa E u keramičkoj cijevi osigurana metalnom kvačicom, uronjena u radni medij kupke



Slika 11. Multipleksor na koji su spojene dvije termoparske žice



Slika 12. Multimetar



Slika 13. Računalo (lijevo) i multimetar (desno)

4.3. Ispitivanje dva termopara tipa S i dva termopara tipa K

4.3.1. Aparatura i opis postupka

Dva termopara tipa S, označeni crnom i crvenom bojom, postavljena su u keramičku cijev koja je zatvorena na svom dnu zajedno s jednim termoparom tipa K termopara, označenim zelenom bojom. Preostali K tip termopara, označen crnom bojom, postavljen je zasebno u identičnu keramičku cijev. Sve keramičke cijevi su osigurane protiv pomicanja pomoću metalne kvačice, koja se nalazi pri samom poklopcu kupke [slika 14]. U početnom položaju, svi termoparovi su potpuno uronjeni u kupku. Za određivanje uzdužnih pomaka termoparova, korišten je tračni metar.

Svi termoparovi su zatim spojeni na bakreni vod - tri grupirana termopara preko svojih zasebnih kompenzacijskih vodova, dok za crni K tip termopara nije korišten kompenzacijski vod. Kompenzacijski vod je izrađen od materijala različitog sastava od materijala pripadnog termopara, ali ima slična termoelektrična svojstva pa njegova upotreba ne utječe na generirani napon dokle god mu je temperatura niža od otprilike 200 °C. Budući da su ispitivanja provedena pri nominalnoj temperaturi kupke od 180 °C, kompenzacijski vodovi nisu mogli imati negativan utjecaj na kvalitetu rezultata mjerenja. Koristi se kada termoparska žica nije dovoljno dugačka da se direktno spoji na bakreni vod ali i radi lakšeg povezivanja s udaljenim milivoltmetrom.

Tijekom ovih mjerenja hladni krajevi termoparova su bili uronjeni u termos posudu napunjenu mješavinom leda i vode. Time je ostvarena temperatura spojeva termoparskih žica i bakrenih vodova od 0 °C. Iz navedenog razloga računalo neće provoditi korekciju temperature kao u prethodnom ispitivanju. Tijekom ispitivanja potrebno je promiješati ovu mješavinu kako bi se održavala stalna temperatura od 0 °C te u slučaju porasta temperature, dobiti svježi led u posudu. Također, treba napomenuti i da je zeleni K tip termopara obložen staklenom vunom na mjestu spoja termoparske i bakrene žice, s ciljem sprječavanja strujanja zraka sobne temperature koji bi mogao zagrijati spomenuti spoj [slika 15].

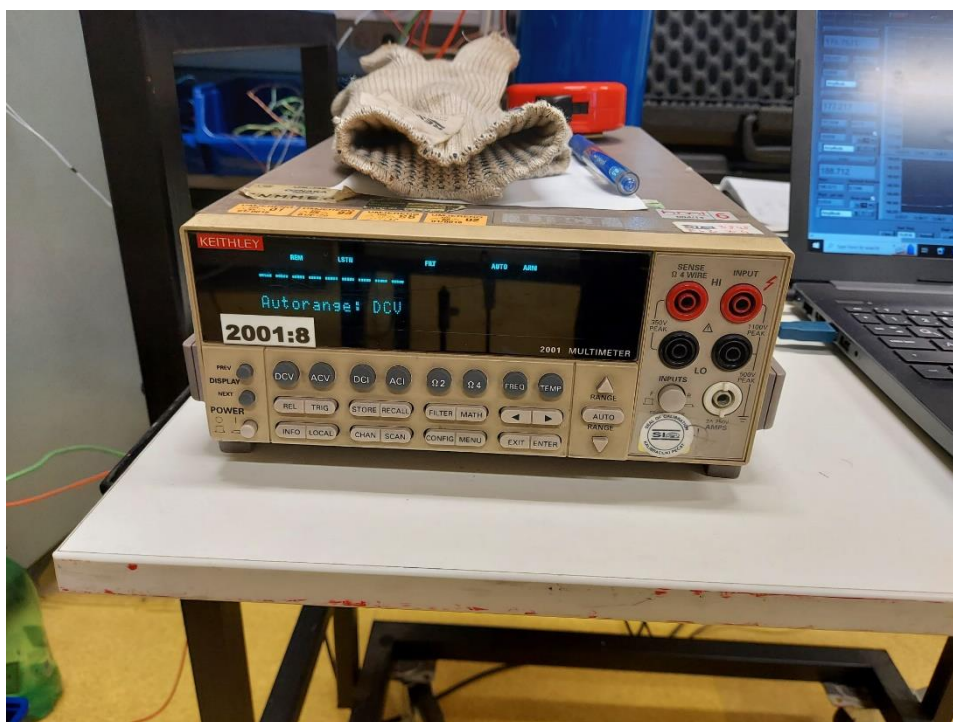
Potom, bakrenim žicama je spojen svaki pojedinačni termopar na multimeter [slika 16] koji se koristi za mjerenje napona. Multimeter se spaja na računalo [slika 17] koje vrši preračun napona u temperaturu i prikazuje rezultate temperature u ovisnosti o vremenu u obliku dijagrama, za svaki pojedinačni termopar. Položaji termoparova se mijenjaju u prosjeku svakih deset minuta te se bilježe njihovi pomaci. Krajnji pomak za sve termoparove je na 22 cm udaljenosti od početnog položaja (dna kupke). Ispitivanje zatim završava te se prelazi na analizu dobivenih rezultata.



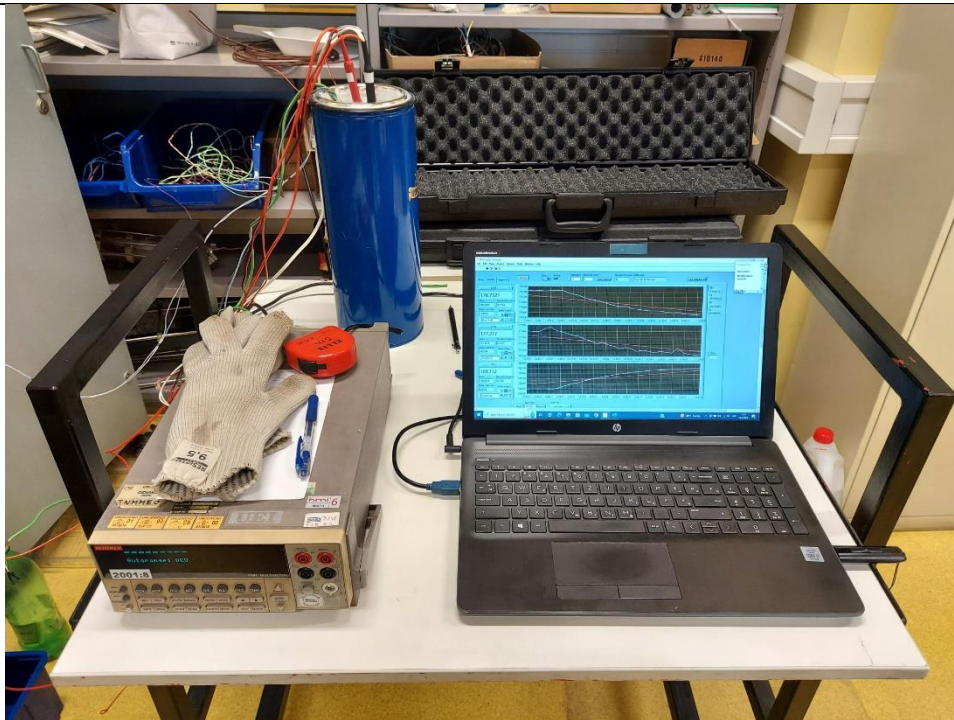
Slika 14. Dva termopara tipa S (crni i crveni) i termopar tip K (zeleni) se nalaze odvojeni u svojoj keramičkoj cijevi, dok je preostali termopar tipa K (crni) uloženi u zasebnu keramičku cijev. Sve keramičke cijevi su metalnim kvačicama fiksirane u potrebne položaje.



Slika 15. Hladni krajevi termoparova pri temperaturi od 0 °C



Slika 16. Multimetar

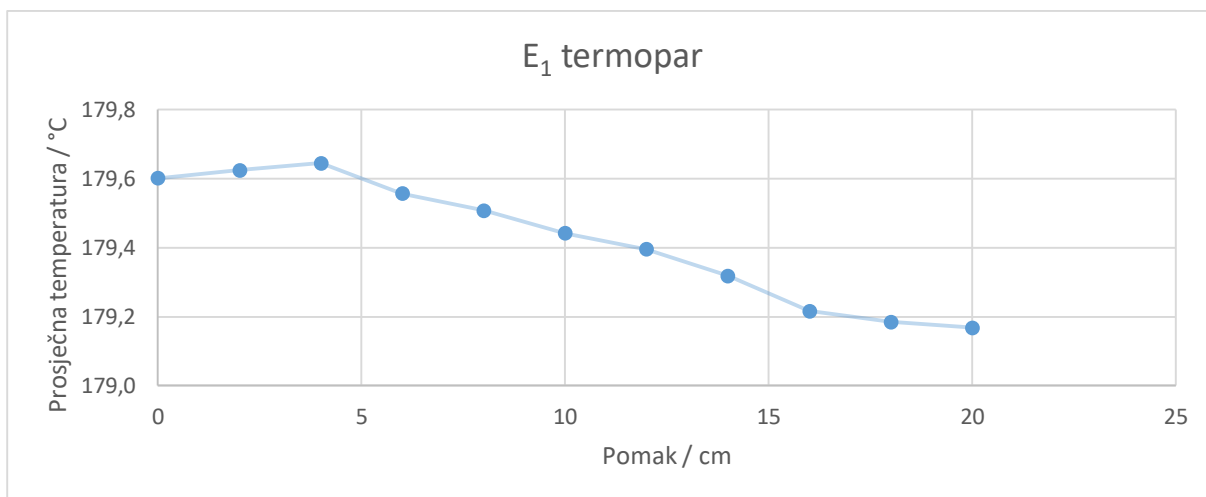


Slika 17. Slijeva nadesno – multimeter, hladni krajevi termoparova, računalo

5. PRIKAZ I ANALIZA REZULTATA

5.1. Prikaz prosječne temperature po pomaku i izračun nehomogenosti pri temperaturi od 180 °C

Računalo je zapisivalo napone i temperature izmjerene termoparovima desetak puta u minuti, za svaki pojedini pomak. Uzevši u obzir to da se promjena pomaka termopara odvijala u prosjeku svakih deset minuta, zabilježeno je više od tisuću očitavanja temperatura i napona od početka do kraja ispitivanja. Izračunom standardne devijacije, svakih deset očitavanja, određen je približan trenutak promjene položaja termopara te u skladu s tim, odabrano je petnaest očitavanja temperature i napona prije tog trenutka, kao mjeru pomoću koje će se provesti analiza rezultata. Za svaki pojedini pomak, za petnaest očitavanja temperature izračunata je srednja vrijednost tih temperatura te su rezultati prikazani u dijagramima ovisnosti prosječne temperature po pomaku, za svaki od šest ispitivanih termoparova. Nehomogenost, izražena u stupnjevima Celzijevim, izračunata je kao razlika najveće i najmanje prosječne temperature po svim pomacima. Početni položaj svakog pojedinog termopara je uzet kao potpuno uronjenje termopara. Uzdužni pomak termoparova podrazumijeva njihovo postepeno izvlačenje iz kupke s korakom od 2 cm. Krajnja vrijednost pomaka iznosi 20 cm udaljenosti u odnosu na početni položaj. U nastavku na slikama 18, 19, 20, 21, 22 i 23, slijede prikazi dijagrama ovisnosti prosječnih temperatura o pomacima za svaki pojedini termopar. Dva termopara tipa E su označena kao E₁ i E₂, dva tipa S kao S₁ i S₂ te dva tipa K kao K₁ i K₂.

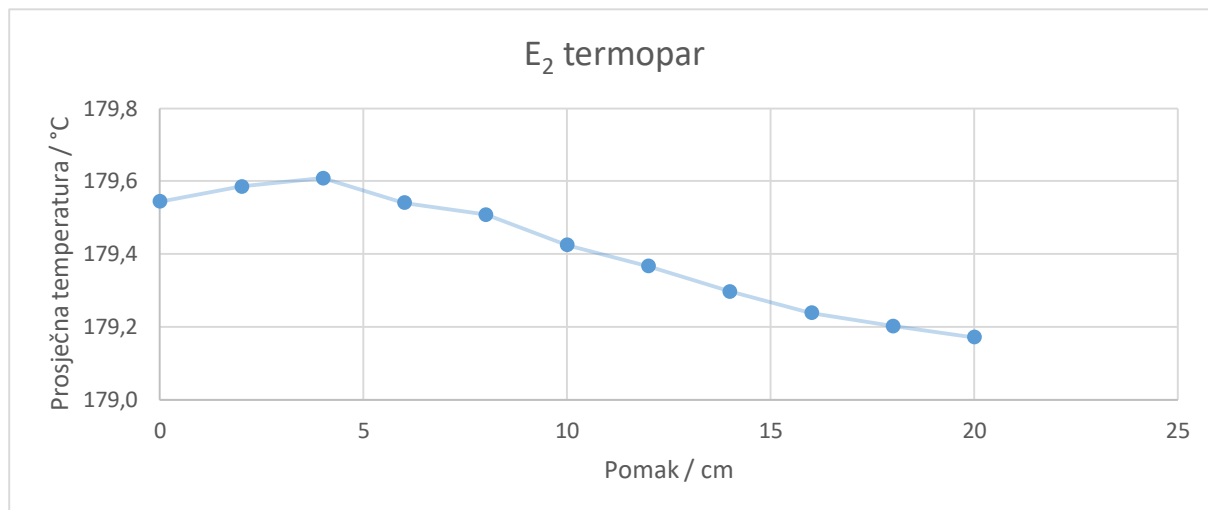


Slika 18. Ovisnost prosječne izmjerene temperature o pomaku za termopar E₁

$$\text{Nehomogenost}_{E_1} = t_{\max E_1} - t_{\min E_1} \quad (12)$$

$$\text{Nehomogenost}_{E_1} = 179,645 \text{ °C} - 179,168 \text{ °C}$$

$$\text{Nehomogenost}_{E_1} = 0,477 \text{ °C}$$

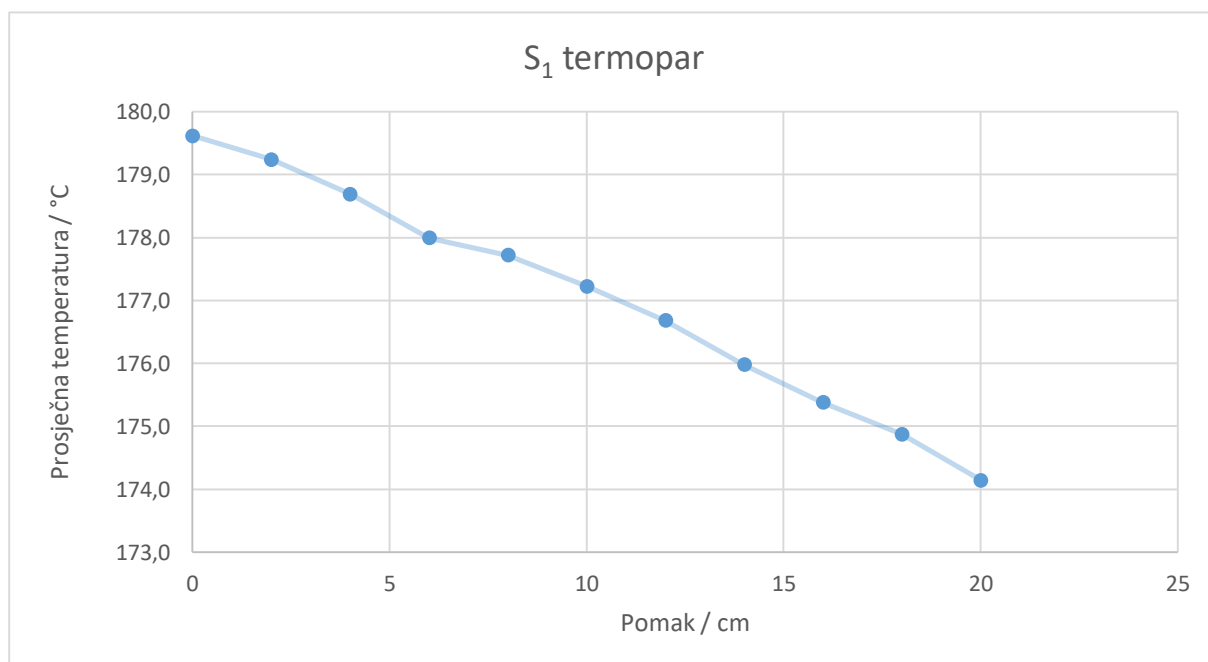


Slika 19. Ovisnost prosječne izmjerene temperature o pomaku za termopar E₂

$$\text{Nehomogenost}_{E_2} = t_{\max E_2} - t_{\min E_2} \quad (13)$$

$$\text{Nehomogenost}_{E_2} = 179,608 \text{ °C} - 179,171 \text{ °C}$$

$$\text{Nehomogenost}_{E_2} = 0,437 \text{ °C}$$

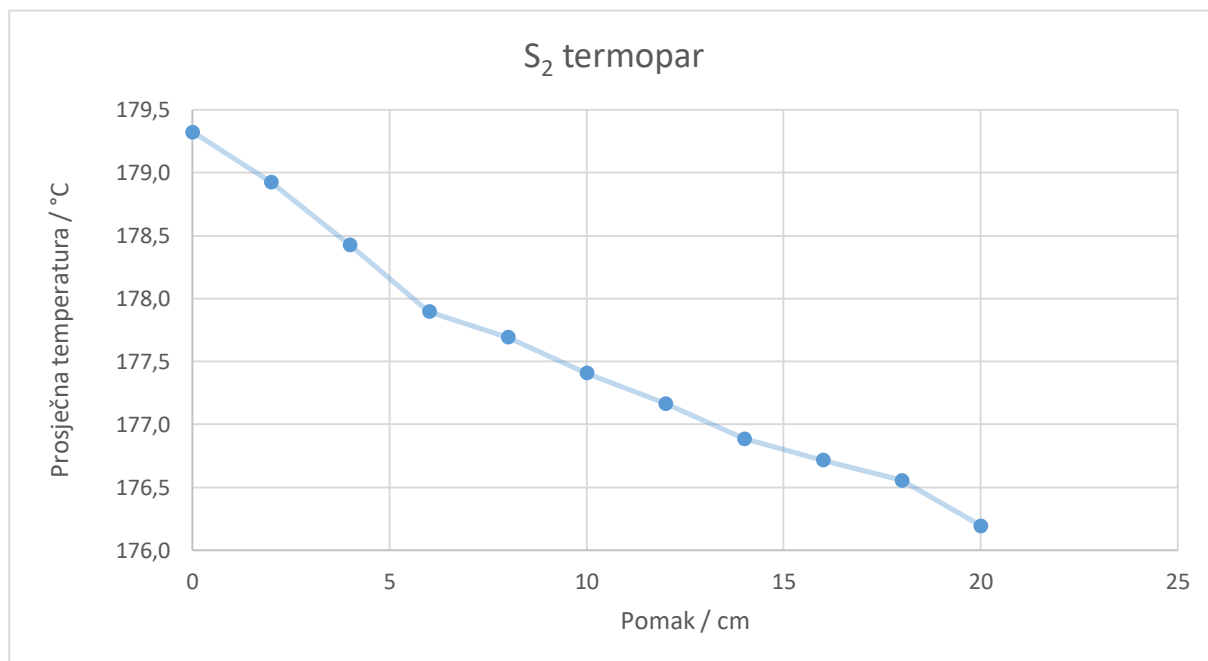


Slika 20. Ovisnost prosječne izmjerene temperature o pomaku za termopar S₁

$$\text{Nehomogenost}_{S_1} = t_{\max S_1} - t_{\min S_1} \quad (14)$$

$$\text{Nehomogenost}_{S_1} = 179,615 \text{ °C} - 174,139 \text{ °C}$$

$$\text{Nehomogenost}_{S_1} = 5,476 \text{ °C}$$

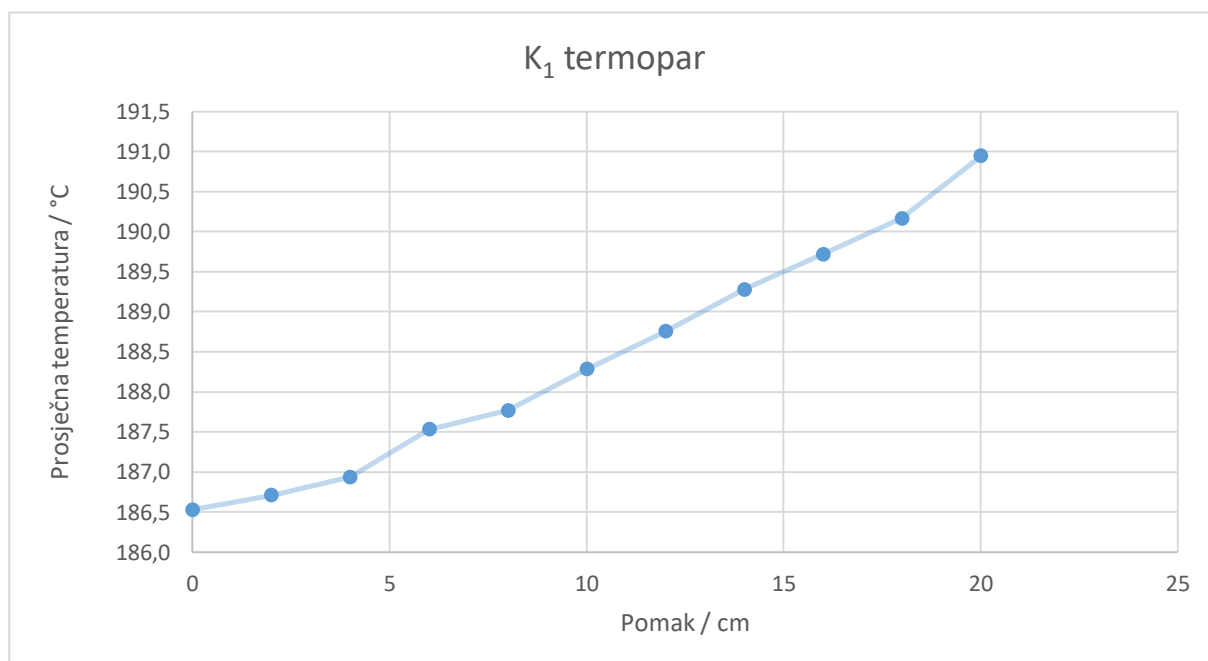


Slika 21. Ovisnost prosječne izmjerene temperature o pomaku za termopar S₂

$$\text{Nehomogenost}_{S_2} = t_{\max S_2} - t_{\min S_2} \quad (15)$$

$$\text{Nehomogenost}_{S_2} = 179,323 \text{ °C} - 176,195 \text{ °C}$$

$$\text{Nehomogenost}_{S_2} = 3,128 \text{ °C}$$

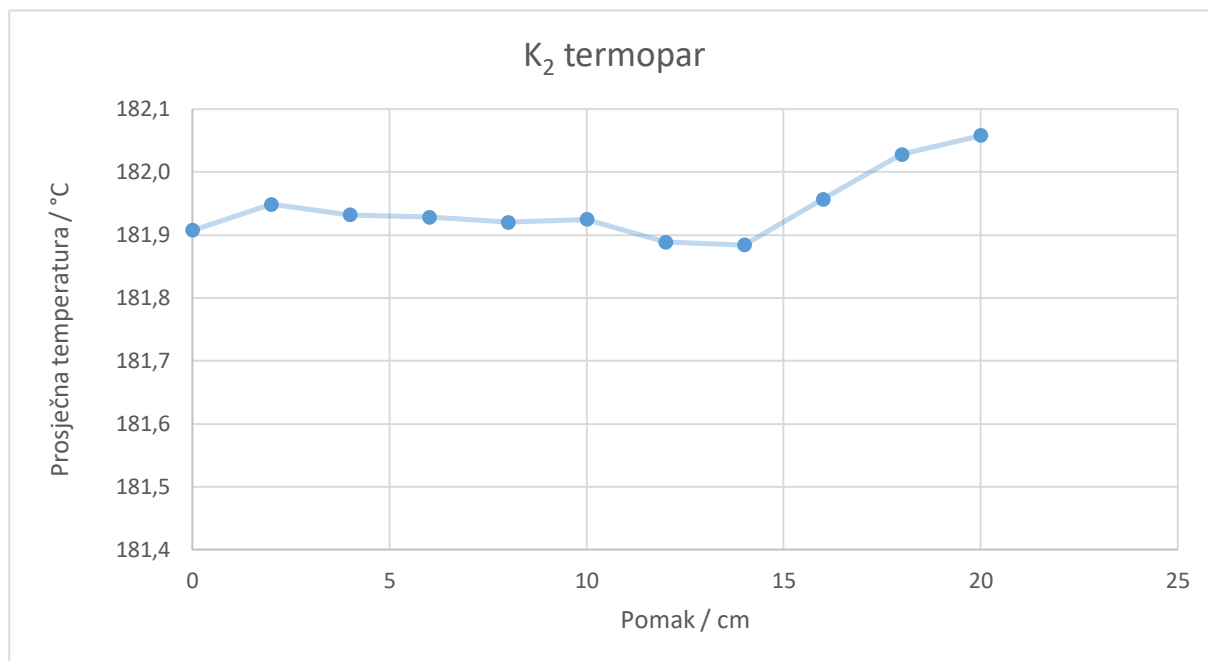


Slika 22. Ovisnost prosječne izmjerene temperature o pomaku za termopar K₁

$$\text{Nehomogenost}_{K_1} = t_{\max K_1} - t_{\min K_1} \quad (16)$$

$$\text{Nehomogenost}_{K_1} = 190,943 \text{ }^\circ\text{C} - 186,529 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Nehomogenost}_{K_1} = 4,414 \text{ }^\circ\text{C}$$



Slika 23. Ovisnost prosječne izmjerene temperature o pomaku za termopar K_2

$$\text{Nehomogenost}_{K_2} = t_{\max K_2} - t_{\min K_2} \quad (17)$$

$$\text{Nehomogenost}_{K_2} = 182,058 \text{ }^\circ\text{C} - 181,884 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Nehomogenost}_{K_2} = 0,174 \text{ }^\circ\text{C}$$

5.1.1. E tipovi termoparova

E_1 termopar mjeri $179,645 \text{ }^\circ\text{C}$ kao najveću prosječnu temperaturu po pomaku, pri pomaku od 4 cm, dok je najniža $179,137 \text{ }^\circ\text{C}$, pri pomaku od 20 cm. Ovo rezultira nehomogenosti E_1 termopara od $0,477 \text{ }^\circ\text{C}$. Najveća prosječna temperatura po pomaku kod E_2 termopara iznosi $179,608 \text{ }^\circ\text{C}$, pri pomaku od 4 cm, a najmanja $179,171 \text{ }^\circ\text{C}$ pri pomaku od 20 cm. Pritom, nehomogenost iznosi $0,437 \text{ }^\circ\text{C}$. Oba termopara mjere prosječne temperature bliske $180 \text{ }^\circ\text{C}$, s tim da E_2 karakterizira manja nehomogenost od E_1 .

5.1.2. S tipovi termoparova

Najveća prosječna temperatura po pomaku, koju mjeri S_1 termopar iznosi $179,615 \text{ }^\circ\text{C}$, pri potpunoj uronjenosti termopara, a najmanja $174,139 \text{ }^\circ\text{C}$ pri pomaku od 20 cm. Kod S_2 termopara te temperature iznose $179,323 \text{ }^\circ\text{C}$ i $176,195 \text{ }^\circ\text{C}$ pri istim pomacima kao i kod S_1 termopara. Ovime su utvrđene nehomogenosti od $5,476 \text{ }^\circ\text{C}$ za termopar S_1 i $3,128 \text{ }^\circ\text{C}$ za S_2 .

Najveće prosječne temperature očitane pomoću oba tipa S termopara, bliske su onima kod oba E tipa termopara, dok su najmanje očitane prosječne temperature manje u odnosu na one kod oba E termopara čak i do nekoliko stupnjeva Celzijevih. Utvrđeno je da su nehomogenosti ispitivanih termoparova tipa S bile veće od nehomogenosti ispitivanih termoparova tipa E. Pretpostavlja se da je velika nehomogenost posljedica dugotrajne izloženosti termoparova tipa S temperaturama višim od 1000 °C, dok termoparovi tip E nisu korišteni na temperaturama višim od 300 °C.

5.1.3. K tipovi termoparova

Nakon provedenih mjerenja za K₁ termopar, najveća prosječna temperatura po pomaku iznosi 190,943 °C, a najmanja 186,529 °C. Razlika u odnosu na prethodno analizirane termoparove je u tome što se najveća prosječna temperatura nalazi na najvećem pomaku, pri 20 cm. Najmanja temperatura se nalazi pri potpunoj uronjenosti termopara. Za K₂ termopar te temperature su 182,058 °C pri pomaku od 20 cm i 181,884 °C pri 14 cm pomaka. Najveća i najmanja prosječna temperatura oba K tipa termopara, veće su u odnosu na druga dva tipa termopara te prelaze 180 °C. Nehomogenost K₂ termopara je ujedno i najmanja u odnosu na nehomogenost svih ranije ispitivanih termoparova.

5.2. Prikaz nehomogenosti i mjerne nesigurnosti u rasponu temperatura od 150 °C do 1100 °C

S obzirom na to da je termoparove moguće upotrijebiti u širokom temperaturnom rasponu, potrebno je odrediti njihovu nehomogenost i njen utjecaj na mjernu nesigurnost i pri temperaturama koje se razlikuju od one s kojom su provedena ispitivanja (180 °C). Obje veličine će se izraziti u stupnjevima Celzijevih. Za zadani temperaturni raspon uzet je interval temperatura od 150 °C do 1100 °C.

S obzirom na to da se E tip termopara obično ne primjenjuje na temperaturama većim od 870 °C, kao krajnja temperatura za izražavanje ranije spomenutih vrijednosti je 1000 °C.

Numerički primjer računanja nehomogenosti i pripadne mjerne nesigurnost bit će dan poslije objašnjenja svih veličina potrebnih za izračun, ispod tablice sa svim popisanim veličinama, u nastavku.

Formula potrebna za izračunavanje mjerne nesigurnosti zbog nehomogenosti glasi:

$$u(k=2) = (E_{\max} - E_{\min}) \cdot \left[\frac{E(T_{\text{u potrošeni}})}{E(T_{\text{grijača}})} \right] \cdot \frac{1}{2\sqrt{3}} \cdot 2 \quad (18)$$

te se izražava u milivoltima. Oznaka $k = 2$ označava faktor prekrivanja, odnosno da je razina pouzdanosti 95,45%. Razlika maksimalnog i minimalnog napona je ista ona razlika prosječnih

temperatura po svakom pojedinom pomaku, korištena za računanje nehomogenosti pri temperaturi od 180 °C, preračunata u napon u milivoltima. Veličina $E(T_{u \text{ upotrebi}})$ se dobije preračunavanjem temperature pri kojoj se želi odrediti pripadajuća nehomogenost i mjerna nesigurnost, u napon u milivoltima. Primjerice za temperaturu od 150 °C, za E tip termopara, pripadajući napon iznosi 9,789 mV. $E(T_{grijača})$ je napon u milivoltima koji se dobije preračunavanjem temperature uljne kupke, koja iznosi 180 °C te primjerice, za S tip termopara, on iznosi 1,273 mV. Dakle, pri rasponu temperatura od 150 °C do 1100 °C, za svaki pojedini termopar, konstantne veličine su razlika najvećeg i najmanjeg napona i napon dobiven preračunavanjem temperature uljne kupke. Veličina koja se mijenja je napon dobiven pretvorbom temperature „u upotrebi“.

Nakon izračunate mjerne nesigurnosti zbog nehomogenosti svakog pojedinog termopara pri svakoj temperaturi u zadanom rasponu, izražene u milivoltima, potrebno je izraziti tu istu nesigurnost u stupnjevima Celzijevih. Ovo se radi množenjem izračunate mjerne nesigurnosti u milivoltima s koeficijentom osjetljivosti izraženom u stupnjevima Celzijevih po milivoltima (C/mV). Koeficijent osjetljivosti je koeficijent kojim se izražava promjena temperature pri maloj promjeni napona ($\Delta E \rightarrow 0$).

Nehomogenost pri pripadajućoj temperaturi, izražena u milivoltima, dobije se množenjem mjerne nesigurnosti, izražene u milivoltima, s $\sqrt{3}$.

Iz toga, nehomogenost pri pripadajućoj temperaturi, izražena u stupnjevima Celzijevim, dobije se množenjem nehomogenosti, izražene u milivoltima, s koeficijentom osjetljivosti.

Prikazani rezultati ne uključuju nesigurnost ispitivanja zbog postojanja aksijalnih temperaturnih gradijenata u radnom volumenu kupke, koji iznose otprilike 10 mK ($k=1$). Ovu nesigurnost je moguće naknadno uračunati, kao zasebnu komponentu, prilikom procjene ukupne nesigurnosti mjerenja temperature ispitivanim termoparovima.

Dobiveni rezultati su prikazani u tablicama 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 i 13 u nastavku.

5.2.1. E tipovi termoparova

5.2.1.1. E₁ termopar

Tablica 2: Podaci potrebni za izračun nehomogenosti i nesigurnosti za E₁ termopar

Temperatura °C	$E_{\max} - E_{\min}$ mV	E_T u upotrebi mV	E_T grijača mV	Nesigurnost mV (k=2)	Nehomogenost mV	Koeficijent osjetljivosti °C/mV
150	0,035	9,789	11,951	0,016	0,028	14,055
200	0,035	13,421	11,951	0,023	0,039	13,508
300	0,035	21,036	11,951	0,035	0,061	12,836
400	0,035	28,946	11,951	0,049	0,084	12,491
500	0,035	37,005	11,951	0,062	0,108	12,356
600	0,035	45,093	11,951	0,076	0,131	12,398
700	0,035	53,112	11,951	0,089	0,155	12,555
800	0,035	61,017	11,951	0,102	0,178	12,750
900	0,035	68,787	11,951	0,116	0,200	13,015
1000	0,035	76,373	11,951	0,128	0,222	13,306

Tablica 3: Prikaz nesigurnosti zbog nehomogenosti i nehomogenosti u zadanom temperaturnom intervalu za E₁ termopar

Temperatura °C	Nesigurnost °C (k=2)	Nehomogenost °C
150	0,231	0,400
200	0,305	0,527
300	0,454	0,786
400	0,607	1,052
500	0,768	1,330
600	0,939	1,626
700	1,120	1,940
800	1,307	2,263
900	1,504	2,605
1000	1,707	2,956

5.2.1.2. Numerički primjer određivanja vrijednosti u tablici upotrebom formula za E₁ termopar pri temperaturi od 150 °C

Iz dijagrama za E₁ termopar pri temperaturi od 180 °C su očitane temperature:

$$t_{\max} = 179,645 \text{ °C}$$

$$t_{\min} = 179,168 \text{ °C}$$

Naponi koji odgovaraju ovim temperaturama su:

$$E_{\max} = 11,925 \text{ mV}$$

$$E_{\min} = 11,890 \text{ mV}$$

$$E_{\max} - E_{\min} = 11,925 - 11,888$$

$$E_{\max} - E_{\min} = 0,035 \text{ mV}$$

Napon E_T u upotrebi koji odgovara temperaturi od 150 °C iznosi:

$$E_{T \text{ u upotrebi}} = 9,789 \text{ mV}$$

Napon E_T grijača koji odgovara temperaturi od 180 °C iznosi:

$$E_{T \text{ grijača}} = 11,951 \text{ mV}$$

Nesigurnost, izražena u milivoltima, pomoću formule (18) iznosi:

$$u (k=2) = 0,037 \cdot \frac{9,789}{11,951} \cdot \frac{1}{2\sqrt{3}} \cdot 2$$

$$u (k=2) = 0,016 \text{ mV}$$

Nehomogenost, izražena u milivoltima iznosi:

$$\text{Nehomogenost (mV)} = u (k = 2) \cdot \sqrt{3}$$

$$\text{Nehomogenost (mV)} = 0,016 \cdot \sqrt{3}$$

$$\text{Nehomogenost (mV)} = 0,028 \text{ mV}$$

Tražena nesigurnost, izražena u stupnjevima Celzijevim:

$$\text{Nesigurnost (k=2)} = u (k=2) \cdot \text{Koeficijent osjetljivosti (pri } t = 150 \text{ °C)}$$

$$\text{Nesigurnost (k=2)} = 0,016 \cdot 14,055$$

$$\text{Nesigurnost (k=2)} = 0,231 \text{ °C}$$

Tražena nehomogenost, izražena u stupnjevima Celzijevih:

$$\text{Nehomogenost (°C)} =$$

$$= \text{Nehomogenost (mV)} \cdot \text{Koeficijent osjetljivosti (pri } t = 150 \text{ °C)}$$

$$\text{Nehomogenost (°C)} = 0,028 \cdot 14,055$$

$$\text{Nehomogenost (°C)} = 0,400 \text{ °C}$$

Analogni postupak se provodi za svaku sljedeću temperaturu, za svaki od ispitivanih termoparova.

5.2.1.3. E_2 termopar**Tablica 4: Podaci potrebni za izračun nehomogenosti i nesigurnosti za E_2 termopar**

Temperatura °C	$E_{\max} - E_{\min}$ mV	$E_{T u}$ upotrebi mV	$E_{T \text{ grijača}}$ mV	Nesigurnost mV ($k=2$)	Nehomogenost mV	Koeficijent osjetljivosti °C/mV
150	0,032	9,789	11,951	0,015	0,026	14,055
200	0,032	13,421	11,951	0,021	0,036	13,508
300	0,032	21,036	11,951	0,032	0,056	12,836
400	0,032	28,946	11,951	0,045	0,077	12,491
500	0,032	37,005	11,951	0,057	0,099	12,356
600	0,032	45,093	11,951	0,069	0,120	12,398
700	0,032	53,112	11,951	0,082	0,142	12,555
800	0,032	61,017	11,951	0,094	0,163	12,750
900	0,032	68,787	11,951	0,106	0,183	13,015
1000	0,032	76,373	11,951	0,118	0,204	13,306

Tablica 5: Prikaz nesigurnosti zbog nehomogenosti i nehomogenosti u zadanom temperaturnom intervalu za E_2 termopar

Temperatura °C	Nesigurnost °C ($k=2$)	Nehomogenost °C
150	0,212	0,367
200	0,279	0,483
300	0,416	0,720
400	0,557	0,964
500	0,704	1,219
600	0,861	1,490
700	1,026	1,778
800	1,197	2,074
900	1,378	2,387
1000	1,564	2,709

5.2.2. S tipovi termoparova

5.2.2.1. S₁ termopar

Tablica 6: Podaci potrebni za izračun nehomogenosti i nesigurnosti za S₁ termopar

Temperatura °C	$E_{\max} - E_{\min}$ mV	$E_{T u}$ upotrebi mV	$E_{T \text{ grijača}}$ mV	Nesigurnost mV ($k=2$)	Nehomogenost mV	Koeficijent osjetljivosti °C/mV
150	0,045	1,029	1,273	0,021	0,037	125,416
200	0,045	1,441	1,273	0,030	0,051	118,205
300	0,045	2,323	1,273	0,048	0,082	109,510
400	0,045	3,259	1,273	0,067	0,116	104,511
500	0,045	4,233	1,273	0,087	0,150	101,002
600	0,045	5,239	1,273	0,107	0,186	97,970
700	0,045	6,275	1,273	0,129	0,223	94,987
800	0,045	7,345	1,273	0,150	0,261	92,001
900	0,045	8,449	1,273	0,173	0,300	89,174
1000	0,045	9,587	1,273	0,196	0,340	86,660
1100	0,045	10,757	1,273	0,220	0,382	84,490

Tablica 7: Prikaz nesigurnosti zbog nehomogenosti i nehomogenosti u zadanom temperaturnom intervalu za S₁ termopar

Temperatura °C	Nesigurnost °C ($k=2$)	Nehomogenost °C
150	2,645	4,581
200	3,489	6,042
300	5,211	9,026
400	6,978	12,086
500	8,758	15,170
600	10,513	18,209
700	12,210	21,148
800	13,842	23,975
900	15,434	26,732
1000	17,019	29,477
1100	18,616	32,245

5.2.2.2. S_2 termopar**Tablica 8: Podaci potrebni za izračun nehomogenosti i nesigurnosti za S_2 termopar**

Temperatura °C	$E_{\max} - E_{\min}$ mV	$E_{T u}$ upotrebi mV	$E_{T \text{ grijača}}$ mV	Nesigurnost mV ($k=2$)	Nehomogenost mV	Koeficijent osjetljivosti °C/mV
150	0,026	1,029	1,273	0,012	0,021	125,416
200	0,026	1,441	1,273	0,017	0,029	118,205
300	0,026	2,323	1,273	0,027	0,047	109,510
400	0,026	3,259	1,273	0,038	0,066	104,511
500	0,026	4,233	1,273	0,050	0,086	101,002
600	0,026	5,239	1,273	0,061	0,106	97,970
700	0,026	6,275	1,273	0,074	0,127	94,987
800	0,026	7,345	1,273	0,086	0,149	92,001
900	0,026	8,449	1,273	0,099	0,171	89,174
1000	0,026	9,587	1,273	0,112	0,195	86,660
1100	0,026	10,757	1,273	0,126	0,218	84,490

Tablica 9: Prikaz nesigurnosti zbog nehomogenosti i nehomogenosti u zadanom temperaturnom intervalu za S_2 termopar

Temperatura °C	Nesigurnost °C ($k=2$)	Nehomogenost °C
150	1,512	2,619
200	1,995	3,455
300	2,980	5,161
400	3,990	6,911
500	5,009	8,675
600	6,012	10,413
700	6,982	12,094
800	7,916	13,710
900	8,826	15,287
1000	9,732	16,856
1100	10,646	18,439

5.3.1. K tipovi termopara

5.3.1.1. K₁ termopar

Tablica 10: Podaci potrebni za izračun nehomogenosti i nesigurnosti za K₁ termopar

Temperatura °C	$E_{\max} - E_{\min}$ mV	$E_{T u}$ upotrebi mV	$E_{T \text{ grijača}}$ mV	Nesigurnost mV ($k=2$)	Nehomogenost mV	Koeficijent osjetljivosti °C/mV
150	0,176	6,138	7,340	0,085	0,147	24,827
200	0,176	8,138	7,340	0,113	0,195	25,022
300	0,176	12,209	7,340	0,169	0,293	24,128
400	0,176	16,397	7,340	0,227	0,394	23,674
500	0,176	20,644	7,340	0,286	0,495	23,459
600	0,176	24,905	7,340	0,345	0,598	23,527
700	0,176	29,129	7,340	0,404	0,699	23,867
800	0,176	33,275	7,340	0,461	0,799	24,390
900	0,176	37,326	7,340	0,517	0,896	24,997
1000	0,176	41,276	7,340	0,572	0,991	25,653
1100	0,176	45,119	7,340	0,625	1,083	26,419

Tablica 11: Prikaz nesigurnosti zbog nehomogenosti i nehomogenosti u zadanom temperaturnom intervalu za K₁ termopar

Temperatura °C	Nesigurnost °C ($k=2$)	Nehomogenost °C
150	2,112	3,658
200	2,822	4,887
300	4,082	7,070
400	5,379	9,317
500	6,711	11,623
600	8,119	14,063
700	9,634	16,686
800	11,246	19,479
900	12,929	22,394
1000	14,672	25,413
1100	16,517	28,608

5.3.1.2. K_2 termopar**Tablica 12: Podaci potrebni za izračun nehomogenosti i nesigurnosti za K_2 termopar**

Temperatura °C	$E_{\max} - E_{\min}$ mV	$E_{T u}$ upotrebi mV	$E_{T \text{ grijača}}$ mV	Nesigurnost mV ($k=2$)	Nehomogenost mV	Koeficijent osjetljivosti °C/mV
150	0,007	6,138	7,340	0,003	0,006	24,8270
200	0,007	8,138	7,340	0,004	0,008	25,0216
300	0,007	12,209	7,340	0,007	0,012	24,1279
400	0,007	16,397	7,340	0,009	0,016	23,6739
500	0,007	20,644	7,340	0,011	0,020	23,4586
600	0,007	24,905	7,340	0,014	0,024	23,5266
700	0,007	29,129	7,340	0,016	0,028	23,8675
800	0,007	33,275	7,340	0,018	0,031	24,3901
900	0,007	37,326	7,340	0,020	0,035	24,9969
1000	0,007	41,276	7,340	0,023	0,039	25,6533
1100	0,007	45,119	7,340	0,025	0,043	26,4186

Tablica 13: Prikaz nesigurnosti zbog nehomogenosti i nehomogenosti u zadanom temperaturnom intervalu za K_2 termopar

Temperatura °C	Nesigurnost °C ($k=2$)	Nehomogenost °C
150	0,083	0,144
200	0,111	0,193
300	0,161	0,279
400	0,212	0,367
500	0,265	0,458
600	0,320	0,555
700	0,380	0,658
800	0,444	0,768
900	0,510	0,883
1000	0,579	1,002
1100	0,651	1,128

5.3. Analiza nehomogenosti i mjerne nesigurnosti u rasponu temperatura od 150 °C do 1100 °C**5.3.1. E tipovi termoparova**

Za E_1 termopar, nesigurnost zbog utjecaja nehomogenosti pri 150 °C iznosi 0,231 °C, dok je nehomogenost 0,400 °C. Porastom temperatura, dolazi i do porasta mjerne nesigurnosti i nehomogenosti. Pri 1000 °C, nesigurnost raste na 1,707 °C, dok je nehomogenost 2,956 °C.

Nadalje, pri mjerenju neke srednje temperature zadanog intervala od primjerice 500 °C, nehomogenost iznosi 1,330 °C, uz nesigurnost od 0,768 °C.

E₂ termopar karakterizira nehomogenost od 0,367 °C pri temperaturi od 150 °C te mjerna nesigurnost zbog nehomogenosti od 0,212 °C. Za temperaturu od 1000 °C, nehomogenost iznosi 2,709 °C, dok je mjerna nesigurnost 1,564 °C. U usporedbi s E₁ termoparom, E₂ u cijelom temperaturnom intervalu ima manje nehomogenosti i manje pripadne mjerne nesigurnosti, izražene u stupnjevima Celzijevim. Primjerice, pri temperaturi od 500 °C, karakteristična nehomogenost za E₂ termopar je manja za 0,111 °C od one za E₁. Pripadna mjerna nesigurnost zbog nehomogenosti E₂ termopara je također manja, za 0,064 °C u odnosu na onu za E₁.

5.3.2. S tipovi termoparova

S₁ termopar pri 150 °C karakteriziraju nehomogenost od 4,581 °C i mjerna nesigurnost zbog nehomogenosti od 2,645 °C. Trend rasta vrijednosti nehomogenosti i mjerne nesigurnosti porastom temperature, karakteristična je i za ovaj tip termopara. Pri 1100 °C, nehomogenost iznosi 32,245 °C, dok je mjerna nesigurnost zbog nehomogenosti 18,616 °C. Usporedivši S₁ termopar s ranije analiziranim E₁ termoparom, karakteristična nehomogenost i mjerna nesigurnost zbog nehomogenosti S₁ termopara, preko deset puta su veće na cijelom temperaturnom intervalu u odnosu na one kod E₁. Mjerenjem temperature pri nekoj srednjoj temperaturi zadanog temperaturnog intervala, od primjerice 500 °C, nehomogenost poprima vrijednost od 15,170 °C, dok je nesigurnost zbog nehomogenosti 8,758 °C uz razinu pouzdanosti od 95,45%.

S₂ termopar pokazuje nešto manju nehomogenost u odnosu na S₁. Pri temperaturi od 150 °C ona poprima vrijednost od 2,619 °C te je i pripadna mjerna nesigurnost zbog nehomogenosti manja i iznosi 1,512 °C. Pri temperaturi od 1100 °C, nehomogenost raste na 18,439 °C, dok je mjerna nesigurnost zbog nehomogenosti 10,646 °C. Mjerenje pri nekoj srednjoj temperaturi zadanog temperaturnog intervala, od 500 °C, karakterizira nehomogenost od 8,675 °C i mjernu nesigurnost zbog nehomogenosti od 5,009 °C, što su čak 2,9 puta veća vrijednosti od onih što ih pokazuje E₁ termopar pri dvostruko višoj temperaturi, onoj od 1000 °C.

5.3.3. K tipovi termoparova

K₁ termopar karakterizira nehomogenost u vrijednosti od čak 3,658 °C uz mjernu nesigurnost zbog nehomogenosti od 2,112 °C pri temperaturi od 150 °C. Pri toj temperaturi, od ranije analiziranih termoparova, veću nehomogenost uz pripadajuću mjernu nesigurnost pokazuje samo S₁ termopar. Stoga, za očekivati su i poprilično velike vrijednosti nehomogenosti i

mjernih nesigurnosti pri svim ostalim temperaturama zadanog mjernog intervala. Za 1100 °C, nehomogenost poprima vrijednost od 28,608 °C, a nesigurnost 16,517 °C. Pri nekoj srednjoj temperaturi zadanog mjernog intervala od primjerice 500 °C, nehomogenost i mjerna nesigurnost zbog nehomogenosti S_1 termopara su čak 3,9 puta veći od istih veličina za E_1 termopar pri dvostruko višoj temperaturi, onoj od 1000 °C.

K_2 termopar karakteriziraju nehomogenost od 0,144 °C uz pripadnu mjernu nesigurnost zbog nehomogenosti od 0,083 °C pri temperaturi od 150 °C. Ovo su ujedno i najmanje vrijednosti spomenutih veličina od svih ispitivanih termoparova. Pri temperaturi od 500 °C, vrijednost nehomogenost termopara i dalje ne prelazi 0,5 °C te iznosi 0,458 °C, dok je mjerna nesigurnost zbog nehomogenosti 0,265 °C. Pri 1100 °C, nehomogenost ima vrijednosti od 1,128 °C, a mjerna nesigurnost 0,651 °C. Uspoređujući K_1 i K_2 termoparove pri temperaturi od 500 °C, vrijednosti nehomogenost i mjerne nesigurnosti zbog nehomogenosti kod K_1 su preko 25 puta veće od onih kod K_2 . Nadalje, K_2 je najbliži po vrijednostima nehomogenosti i mjerne nesigurnosti termoparu E_2 . Međutim, uspoređujući vrijednosti ovih veličina oba termopara pri 500 °C, E_2 termopar karakteriziraju vrijednosti 2,7 puta veće od onih za K_2 . Činjenicu da je nehomogenost termopara K_2 znatno niža od nehomogenosti ostalih ispitivanih termoparova lako je objasniti time da je jedino taj termopar podvrgnut ispitivanju potpuno nov, bez da se ikad prije koristio za mjerenje temperature.

6. ZAKLJUČAK

Na temelju dobivenih dijagrama ovisnosti prosječnih temperatura po pomaku, vidljivo je da je ispitivanje nehomogenosti termopara vrlo važan postupak vezan uz mjerenje temperature termoparom jer daje jasnu sliku o rasporedu temperatura na različitim dubinama uranjanja termopara. Na temelju izmjerenih nehomogenosti, i pripadnih nesigurnosti, korisnik može procijeniti da li je pojedini termopar prikladan za provedbu mjerenja temperature.

Analizom nehomogenosti i pripadnih mjernih nesigurnosti zbog nehomogenosti po dvaju termoparova tipa E, S i K, u temperaturnom intervalu od 150 °C do 1100 °C, primijećene su sljedeće zakonitosti.

Termoparovi tipa E se uobičajeno primjenjuju za mjerenje temperatura u rasponu od -200 °C do 870 °C. Za ispitane termoparove E_1 i E_2 , vrijednosti nehomogenosti i pripadnih mjernih nesigurnosti rastu u čitavom intervalu. Uspoređujući E_1 i E_2 , numerička razlika nehomogenosti i mjerne nesigurnosti zbog nehomogenosti između dva termopara nije toliko izražena, no svejedno je dovoljan kriterij za odabir E_2 termopara pri mjerenjima temperature ispred E_1 .

Uobičajena upotreba termoparova tipa S je u temperaturnom intervalu od 0 °C do 1450 °C. Oba ispitana termopara tipa S pokazuju veće vrijednosti nehomogenosti i mjerne nesigurnosti u odnosu na oba termopara tipa E. Ovo nije uobičajeno budući da su termoparske žice termoparova tipa S izrađene od plemenitih metala (platine i rodija), koji zbog kemijske inertnosti općenito imaju bolje performanse u odnosu na termoparove izrađene od baznih metala (tip E i tip K). Velika nehomogenost ispitanih termoparova S_1 i S_2 je, u ovom slučaju, posljedica njihove dugotrajne izloženosti temperaturama višim od 1000 °C. Vrlo velike nesigurnosti zbog nehomogenosti termoparova tipa S, koje su utvrđene u okviru ovog rada, općenito ukazuju na veliku važnost periodičkog provođenja ispitivanja nehomogenosti termoparova. Na temelju rezultata ispitivanja nehomogenosti može se zaključiti da se termopar S_2 pokazao nešto boljim izborom od termopara S_1 .

Uobičajen mjerni temperaturni interval za K tip termopara je u rasponu od 0 °C do 1260 °C. Ovim ispitivanjem je utvrđeno da se nehomogenost termopara K_1 znatno razlikuje od nehomogenosti termopara K_2 . One su na zadanom intervalu i do nekoliko puta veće od onih kod K_2 termopara. Ovakav rezultat objašnjava činjenica da termopar K_2 , za razliku od termopara K_1 , prije ispitivanja nehomogenosti nije nikada bio korišten. Rezultati ispitivanja jasno ukazuju na to da bi za mjerenje temperature termopar K_2 bio znatno bolji odabir u odnosu na termopar K_1 .

LITERATURA

- [1] Šestan D., Predavanja iz kolegija Mjerenja u energetici
- [2] Zvizdic D., Veliki T., Testing of Thermocouples for Inhomogeneity, 2006.
- [3] Nicholas J.V., White D.R., Traceable Temperatures: An Introduction to Temperature Measurement and Calibration, poglavlje 8., Thermocouple Thermometry, 2001.
- [4] Hiti M., Bojkovski J., Batagelj V., Drnovšek J., Measurement Device and Procedure for Thermocouple Inhomogeneity Detection, 2005.
- [5] Castanho M. A. P., Baldo C. R., A Study of Inhomogeneities of Thermocouples and Its Contribution to the Calibration Uncertainty Calculus, 2012.
- [6] Nugraha H., Prajitno P., Achmadi A., Sindhu Tistomo A., Larassati D., Imaduddin A., Design of a Scanning Thermocouple Inhomogeneity, 2021.
- [7] Antun Jukić, Ispitivanje karakteristika termostatirane uljne kupke, Završni rad, 2020.

PRILOZI

I. CD-R disc