

Ispitivanje karakteristika termometrijske kupke

Penava, Ante

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:392677>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-27**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ante Penava

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

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

Student:

Ante Penava

Zagreb, 2022.

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

Srdačno se zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Danijelu Šestanu na pruženoj pomoći i stručnim savjetima tijekom izrade ovog rada.

Također veliko hvala asistentu Ivanu Matasu na pomoći prilikom izrade praktičnog dijela završnog rada te na pruženim savjetima tijekom pisanja.

Posebna zahvala mojoj obitelji, prijateljima te djevojci Ivani na podršci i razumijevanju tijekom studiranja.

Ante Penava



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 brodostrojarški

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ante Penava** JMBAG: **0035215585**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje karakteristika termometrijske kupke**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Characterization of liquid thermometry bath**

Opis zadatka:

Potrebno je definirati i provesti postupak ispitivanja karakteristika termometrijske kupke Heto Calibration KB22-1 koja se, u Laboratoriju za procesna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje (FSB-LPM), koristi za provođenje usporedbenih umjeravanja termometara u temperaturnom rasponu od 10 °C do 70 °C. Ispitivanje će obuhvatiti određivanje vremenske stabilnosti temperature i temperaturnih gradijenata u izotermalnom bloku uronjenom u radni medij kupke. Ispitivanje je potrebno provesti u najmanje četiri mjerne točke, u temperaturnom rasponu od 10 °C do 70 °C, pri čemu će se koristiti postojeća oprema u FSB-LPM-u.

U okviru izrade završnog rada potrebno je:

- Dati opis niskotemperaturne kupke sa skicom radnog volumena i shematskim prikazom elemenata za regulaciju temperature.
- Opisati postupak ispitivanja zone kontrolirane temperature, koji uključuje određivanje horizontalnih i vertikalnih temperaturnih gradijenata te stabilnosti temperature u izotermalnom bloku uronjenom u radni medij kupke.
- Prikazati shemu spajanja i dati opis mjernog sustava korištenog za predmetno ispitivanje.
- Sastaviti mjernu liniju za ispitivanje, koristeći postojeće uređaje i pomoćnu opremu koja je na raspolaganju u FSB-LPM-u.
- Prikazati rezultate ispitivanja kupke.
- Opisati postupak procjene i procijeniti utjecaj karakteristika termometrijske kupke na ukupnu nesigurnost umjeravanja termometara, u slučaju kada se kupka koristi u tu svrhu.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.
3. rok: 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Danijel Šestan

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS DIJAGRAMA	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. TERMOMETRIJSKA KUPKA.....	2
2.1. Temperaturni gradijenti.....	3
3. ZONA UMJERAVANJA	4
3.1. Izotermalni blok	4
3.2. Termometrijska kupka bez izotermalnog bloka.....	5
4. OPIS MJERNOG SUSTAVA	7
4.1. Termometrijska kupka	7
4.2. Otpornički termometri.....	9
4.3. Instrumenti za mjerenje električnog otpora osjetnika temperature – otpornički most10	
4.4. Računalo i računalni programi	13
4.5. Oprema za praćenje uvjeta okoline	14
4.6. Ostala korištena oprema.....	14
5. POSTUPAK ODREĐIVANJA KARAKTERISTIKA ZONE KONTROLIRANE TEMPERATURE.....	16
5.1. Postavljanje mjerne linije.....	16
5.2. Praćenje uvjeta okoline	17
5.3. Određivanje radijalnih temperaturnih gradijenata	17
5.4. Određivanje aksijalnih temperaturnih gradijenata	19
5.5. Temperaturna stabilnost	21

5.6. Ukupni doprinos mjernoj nesigurnosti.....	22
6. REZULTATI ISPITIVANJA KUPKE.....	23
6.1. Uvjeti okoliša	23
6.2. Radijalni temperaturni gradijenti	23
6.2.1. Radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od 10°C	23
6.2.2. Radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od 20°C	24
6.2.3. Radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od 30°C	25
6.2.4. Radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od 50°C	25
6.2.5. Radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od 70°C	26
6.3. Aksijalni temperaturni gradijenti	28
6.3.1. Aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od 10°C	28
6.3.2. Aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od 20°C	28
6.3.3. Aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od 30°C	29
6.3.4. Aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od 50°C	29
6.3.5. Aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od 70°C	30
6.4. Stalnost temperature.....	32
6.5. Ukupna mjerna nesigurnost	35
7. Zaključak	37
LITERATURA.....	38
PRILOZI.....	39

POPIS SLIKA

Slika 1.	Prikaz temperaturnih gradijenata.....	3
Slika 2.	Korišteni izotermalni blok.....	4
Slika 3.	Mogući položaji termometara tijekom ispitivanja temperaturnih gradijenata u radnom volumenu zone kontrolirane temperature.....	5
Slika 4.	Uobičajni razmjestaj termometara unutar radnog volumena kupke bez izotermalnog bloka	6
Slika 5.	Laboratorijski postav za ispitivanje.....	7
Slika 6.	Termometrijska kupka "Heto Calibration KB 22-1"	8
Slika 7.	Regulator temperature "Calcon 2000"	8
Slika 8.	Korišteni platinski otpornički termometri	9
Slika 9.	Osjetnik platinskog otporničkog termometra	10
Slika 10.	Termometrijski otpornički most.....	11
Slika 11.	Multipleksor	12
Slika 12.	Sučelje računalnog programa "LabView"	13
Slika 13.	Uređaj za praćenje uvjeta okoline "Testo 176P1"	14
Slika 14.	Stalak za ispitivanje aksijalnih temperaturnih gradijenata	15
Slika 15.	Opći prikaz mjerne linije	16
Slika 16.	Tlocrt izotermalnog bloka i oznake provrta u njemu	17

POPIS TABLICA

Tablica 1. Osnovne karakteristike termometrijske kupke	9
Tablica 2. Tehnički podaci platinskog otporničkog termometra.....	10
Tablica 3. Tehnički podaci termometrijskog otporničkog mosta.....	11
Tablica 4. Tehničke specifikacije multipleksora	12
Tablica 5. Uvjeti okoliša za vrijeme ispitivanja	23
Tablica 6. Eksperimentalno određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 10 °C.....	23
Tablica 7. Matematički određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 10 °C.....	24
Tablica 8. Najveći radijalni gradijent na ispitnoj temperaturi 10 °C.....	24
Tablica 9. Eksperimentalno određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 20 °C.....	24
Tablica 10. Matematički određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 20 °C.....	24
Tablica 11. Najveći radijalni gradijent na ispitnoj temperaturi 20 °C.....	24
Tablica 12. Eksperimentalno određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 30 °C.....	25
Tablica 13. Matematički određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 30 °C.....	25
Tablica 14. Najveći radijalni gradijent na ispitnoj temperaturi 30 °C.....	25
Tablica 15. Eksperimentalno određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 50 °C.....	25
Tablica 16. Matematički određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 50 °C.....	26
Tablica 17. Najveći radijalni gradijent na ispitnoj temperaturi 50 °C.....	26
Tablica 18. Eksperimentalno određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 70 °C.....	26
Tablica 19. Matematički određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 70 °C.....	26
Tablica 20. Najveći radijalni gradijent na ispitnoj temperaturi 70 °C.....	26
Tablica 21. Eksperimentalno određeni aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 10 °C.....	28
Tablica 22. Eksperimentalno određeni aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 20 °C.....	28
Tablica 23. Eksperimentalno određeni aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 30 °C.....	29
Tablica 24. Eksperimentalno određeni aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 50 °C.....	29
Tablica 25. Eksperimentalno određeni aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 70 °C.....	30
Tablica 26. Standardna mjerna nesigurnost zbog aksijalnih gradijenata	30
Tablica 27. Standardna mjerna nesigurnost zbog nestabilnosti temperature	34
Tablica 28. Ukupna (kombinirana) standardna mjerna nesigurnost zbog nesavršenosti kupke	35

POPIS DIJAGRAMA

Dijagram 1.	Standardne mjerne nesigurnosti zbog radijalnih temperaturnih gradijenata	27
Dijagram 2.	Standardne mjerne nesigurnosti zbog aksijalnih temperaturnih gradijenata	31
Dijagram 3.	30-minutna stabilnost temperature u ispitnoj točki 10 °C	32
Dijagram 4.	30-minutna stabilnost temperature u ispitnoj točki 20 °C	32
Dijagram 5.	30-minutna stabilnost temperature u ispitnoj točki 30 °C	33
Dijagram 6.	30-minutna stabilnost temperature u ispitnoj točki 50 °C	33
Dijagram 7.	30-minutna stabilnost temperature u ispitnoj točki 70 °C	34
Dijagram 8.	Standardne mjerne nesigurnosti zbog nestabilnosti temperature.....	35
Dijagram 9.	Ukupna (kombinirana) standardna mjerna nesigurnost zbog nesavršenosti kupke.....	36

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
ϑ	K	temperatura
$grad\vartheta$	K/m	temperaturni gradijent
\vec{n}_0	-	jedinični vektor normale na površinu
a	mK	poluinterval pravokutne razdiobe
u	mK	standardna mjerna nesigurnost uz faktor prekrivanja ($k=1$), što odgovara razini pouzdanosti od 68 %
h	mm	vertikalni položaj osjetnika temperature u odnosu na najnižu poziciju unutar promatranog dijela radnog volumena kupke
φ	-	relativna vlažnost zraka
R_R	-	oznaka referentnog horizontalnog položaja osjetnika temperature unutar promatranog dijela radnog volumena kupke, $R=1$
R_X	-	oznaka nereferentnog horizontalnog položaja osjetnika temperature unutar promatranog dijela radnog volumena kupke, $X=2, 3, \dots, n$
$TEPOT_n$	-	interna laboratorijska oznaka platinskog otporničkog osjetnika temperature, $n=21, 22$
T_n	-	oznaka termometra

SAŽETAK

U sklopu Završnog rada provedeno je ispitivanje karakteristika termometrijske kupke Heto Calibration, koja će se koristiti kao zona kontrolirane temperature pri usporedbenom umjeravanju termometara. Kupka je ispunjena vodom, a ispitivanje je provedeno u temperaturnom rasponu od 10 °C do 70 °C. Kao i u svim drugim umjeravanjima, i ovdje su prisutne određene nesigurnosti, stoga se provedenim ispitivanjem određuju parametri koji imaju utjecaj na mjernu nesigurnost kupke. Ispitivanjem je obuhvaćeno određivanje horizontalnih i vertikalnih temperaturnih gradijenata te stabilnosti temperature u izotermalnom bloku uronjenom u radni medij, a provodi se prema metodi Laboratorija za procesna mjerenja, koja je razvijena na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. U radu je opisana i objašnjena korištena metoda ispitivanja uz prikaz pripadajućih shema, parametara i formula. Rezultati ispitivanja prikazani su tablično i grafički, te je uz njih također opisana i korištena oprema te cijeli postupak mjerenja.

Ključne riječi: termometrijska kupka, mjerna nesigurnost, temperaturna stabilnost, radijalni i aksijalni gradijenti

SUMMARY

Within this bachelor thesis thermometric characteristics of Heto Calibration bath are examined and will be used as controlled temperature zone with simultaneous calibration of the thermometer. The bath is filled with water and research is conducted in the temperature range from 10°C to 70 °C. Just like with any other calibration there is some uncertainty. Because of that certain parameters that influence measurement uncertainty of the bath, are determined. This research covers determination of horizontal and vertical temperature gradient and stability of temperature in isothermal block submerged in work media. It is conducted according to the method of the Laboratory for process measurements, developed at the University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture. In the paper examination methods are described and explained with associated schemes, parameters and formulas. The results of the examinations are exhibited in the table and graphically also the equipment and measurement procedure are described.

Key words: thermometric bath, measurement uncertainty, temperature stability, radial and axial gradient.

1. UVOD

Uz primjerene eksperimente, u sklopu završnog rada, provedeno je ispitivanje karakteristike termometrijske kupke kupke Heto Calibration (interna oznaka *TEKUP11*). Ispitivanje je provedeno u temperaturnom rasponu od 10 °C do 70 °C, a kao radni medij poslužila je voda. Prilikom naknadnog umjeravanja termometara u ovakvoj kupki prisutna je određena mjerna nesigurnost pa se ova testiranja provode kako bi se odredilo koji sve parametri na nju utječu te kolika je ukupna mjerna nesigurnost. Prema rezultatima ispitivanja dobivamo uvid u svojstva kupke, a na temelju tih svojstava možemo procijeniti prikladnost njenog korištenja. Metoda ispitivanja razvijena je u Laboratoriju za procesna mjerenja (LPM) na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu (FSB).

Ispitivanje kupke se svodi na određivanje aksijalnih i radijalnih temperaturnih gradijenata unutar samog radnog volumena i uz njih, temperaturne stabilnosti kupke. Ovi podaci se dalje koriste kod analize rezultata dobivenih umjeravanjem termometara u predmetnoj kupki.

Razlog zašto se provode ovakva ispitivanja kupki je taj što proizvođači kupki daju djelomično nepotpune podatke, a takvi se podaci ne mogu koristiti ako kupku želimo koristiti za umjeravanje termometara visoke preciznosti i točnosti. Iz tog razloga laboratoriji provode ispitivanja karakteristika kupki neovisno o dostupnosti podataka od strane proizvođača. Osim ovog razloga, tijekom korištenja može doći do kvarova ili promjene karakteristika kupki pa je i to razlog zbog kojeg je potrebno provesti ispitivanja.

Budući da ne postoji opće prihvaćena metoda za ispitivanje karakteristika kupki i drugih vrsta zona kontrolirane temperature, koja bi obuhvatila sve tipove, izvedbe i karakteristike kupki, i uz to osigurala i pouzdane rezultate, u ovom radu koristit će se metoda ispitivanja koja je razvijena u Laboratoriju za procesna mjerenja.

2. TERMOMETRIJSKA KUPKA

Termometrijska kupka je zona kontrolirane temperature koja nam služi za umjeravanje termometara. U radnom volumenu, kojeg izlažemo željenoj temperaturi, se nalazi uronjeni izotermalni blok s termometrima koji se umjeravaju. Karakteristika izotermalnog bloka je ujednačenost temperature unutar svog volumena zbog relativno velike inercije materijala. Kod ovakvog umjeravanja nailazimo na različite izvore mjerne nesigurnosti, a da bismo utvrdili o kojim se izvorima radi i odredili njihove iznose, provodi se eksperimentalno ispitivanje. Bitne karakteristike kupke su radijalni i aksijalni temperaturni gradijenti te vremenska stabilnost temperature medija u radnom volumenu kupke, a one ovise o konstrukciji i veličini kupke, radnom mediju i načinu njegove cirkulacije te karakteristikama komponenata za regulaciju temperature.

Razlog zašto se ovakva ispitivanja provode je taj što su informacije vezane uz karakteristiku kupke dosta štire i nepotpune pa se kao takve ne mogu koristiti za umjeravanja termometara s najmanjim nesigurnostima. Također tijekom eksploatacije kupke, dolazi do promjene njene karakteristike pa je potrebno redovito provoditi ispitivanja kako bismo imali što točnije informacije o karakteristici kupke.

Kako u svijetu ne postoji opće prihvaćena metoda za ovakva ispitivanja, laboratoriji širom svijeta razvijaju svoje interne metode. U ovom slučaju korištena je metoda ispitivanja razvijena u Laboratoriju za procesna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Također treba napomenuti da ne postoji idealna zona kontrolirane temperature koja bi bila potpuno vremenski stalna i bez temperaturnih gradijenata te presudnu ulogu igra iskustvo mjeritelja kao i njegovo rukovanje s opremom korištenom za ispitivanje potrebnih karakteristika.

2.1. Temperaturni gradijenti

Vektor okomit na izotermnu plohu koji predstavlja promjenu temperature u smjeru normale naziva se temperaturni gradijent i on je pozitivnog predznaka u smjeru povećanja temperature. Analitički ga prikazujemo kao derivaciju temperature ϑ po normali n :

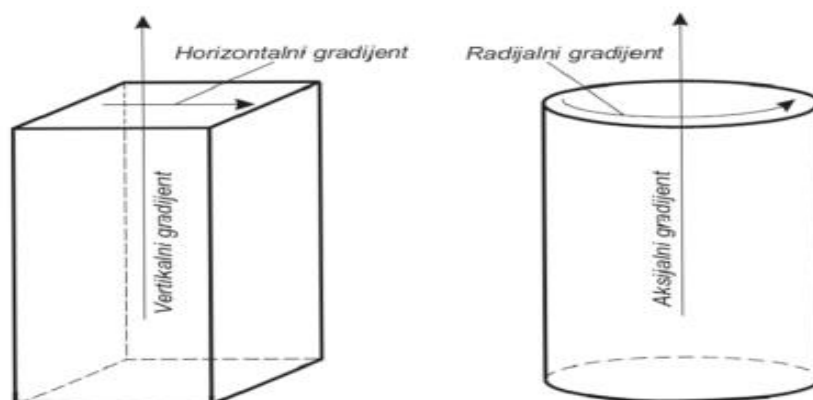
$$\text{grad } \vartheta = \vec{n}_0 * \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\Delta \vartheta}{\Delta n} = \vec{n}_0 * \frac{\delta \vartheta}{\delta n} \quad (1)$$

gdje je:

\vec{n}_0 – jedinični vektor normale, okomit na izotermnu plohu i pozitivno definiran u smjeru promjene temperature

$\frac{\delta \vartheta}{\delta n}$ – skalarna veličina temperaturnog gradijenta izražena u K/m

Razlikujemo horizontalne i vertikalne temperaturne gradijente, a u slučaju cilindričnih oblika govorimo o radijalnim i aksijalnim gradijentima. Prikaz tih gradijenata možemo vidjeti na Slici 1. Ti gradijenti se očituju u promjeni temperature zbog promjene položaja termometra unutar zone umjeravanja. Radijalni gradijenti određeni su temperaturnom razlikom između dva termometra postavljena na različitim mjestima unutar zone umjeravanja ali na istoj visini, dok se aksijalni gradijenti određuju promjenom visine jednog termometra u odnosu na drugi, referentni termometar. Samim time zaključujemo da su za određivanje ovih gradijenata potrebna dva termometra od kojih će jedan biti referentni, stacionirani, a drugi će se pomicati unutar zone umjeravanja.



Slika 1. Prikaz temperaturnih gradijenata

3. ZONA UMJERAVANJA

Unutar radnog volumena kupke uranjamo tzv. izotermalni blok. Kao zona umjeravanja služe nam provrta u izotermalnom bloku u koje postavljamo naše termometre. Promjenom njihove pozicije dalje određujemo temperaturne gradijente u zoni umjeravanja. Također moguća je i izvedba bez izotermalnog bloka, a u takvim izvedbama temperaturne gradijente određujemo na granicama prostora u kojem će se naknadno provoditi za umjeravanja termometara.

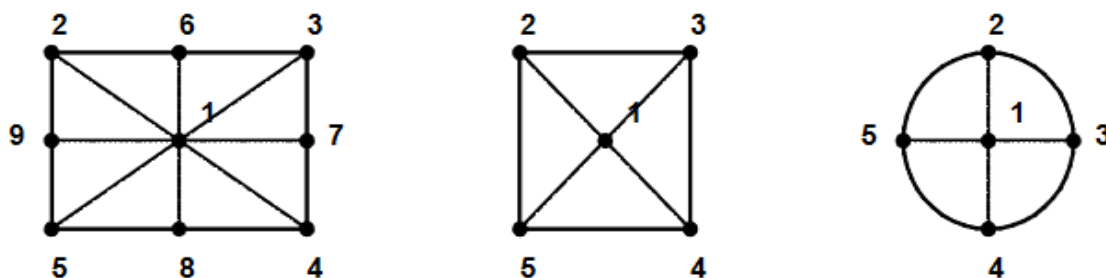
3.1. Izotermalni blok

Prilikom ispitivanja karakteristike kupke korišten je bakreni izotermalni blok u kojem su izbušena četiri provrta, unutar kojih se postavljaju termometri. Zbog velike tromosti, unutar tih provrta imamo veću temperaturnu stabilnost nego u ostatku radnog volumena u koji je blok uronjen. Na Slici 2 je prikazan izotermalni blok kojim je provedeno ispitivanje.



Slika 2. Korišteni izotermalni blok

Temperaturne gradijente unutar bloka određujemo premještanjem termometara u različite provrte, a upravo tako dobivamo precizne rezultate bez obzira na međusobna odstupanja korištenih termometara i nesigurnost njihovog umjeravanja. Zato je potrebno odrediti i korigirati međusobna odstupanja termometara u svakoj promatranoj temperaturnoj točki pa se poništavanje međusobnih odstupanja očitavanja termometara postiže zamjenom njihovih pozicija. Pozicije termometara se same određuju prema iskustvu i obliku zone zbog toga što ne postoje unaprijed određene pozicije, a neki od mogućih položaja ispitivanja su prikazani na Slici 3.



Slika 3. Mogući položaji termometara tijekom ispitivanja temperaturnih gradijenata u radnom volumenu zone kontrolirane temperature

Uz rezultate ispitivanja karakteristika kupke s izotermalnim blokom potrebno je definirati sljedeće:

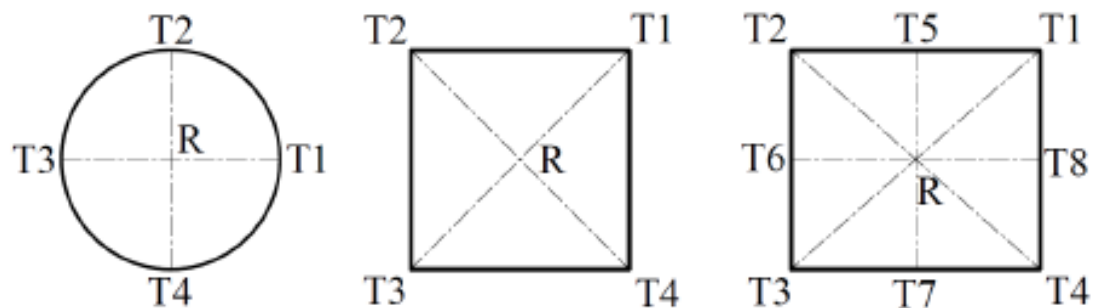
- Smještaj unutar kupke (npr. sredina, visina)
- Dimenzije radnog volumena zone kontrolirane temperature
- Geometrija izotermalnog bloka
- Dimenzije i razmještaj provrta koji jesu (ili nisu) obuhvaćeni ispitivanjem

3.2. Termometrijska kupka bez izotermalnog bloka

Iako u sklopu ovog Završnog rada nije korištena ova metoda, u nastavku će se samo kratko objasniti. Kod ovakvih kupki, mjeritelj postavlja termometre na granice njenog korisnog volumena, a konkretni položaji odabiru se ovisno o obliku i dimenzijama radnog volumena termometrijske kupke. Sami postupak ispitivanja temperaturnih gradijenata jako je sličan onomu sa izotermalnim blokom, samo naravno bez njega pa se ovdje koriste unaprijed definirane pozicije unutar kupke. Obično se termometri postavljaju u oblik nekog pravilnog geometrijskog tijela. Ovdje se referentni termometar najčešće stavlja u sredinu, a bitno je

odrediti međusobnu udaljenost, odnosno visinu na kojoj se korišteni termometri nalaze.

Nekoliko primjera razmještaja termometara u radnom volumenu bez izotermalnog bloka prikazano je na Slici 4.



Slika 4. Uobičajni razmještaj termometara unutar radnog volumena kupke bez izotermalnog bloka

4. OPIS MJERNOG SUSTAVA

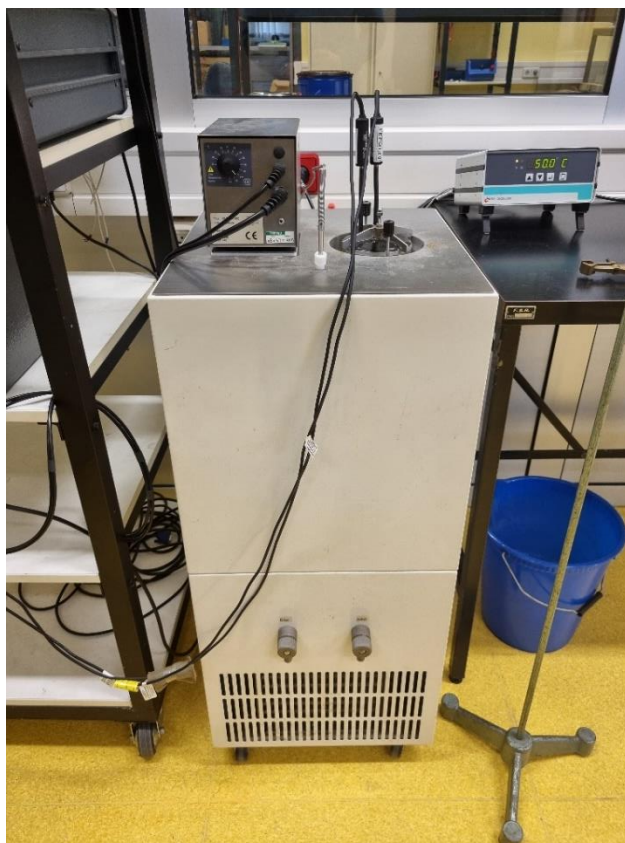
Praktični dio završnog rada odrađen je u Laboratoriju za procesna mjerenja. Na Slici 5 je prikaz cjelokupne mjerne linije, a u nastavku slijedi opis.



Slika 5. Laboratorijski postav za ispitivanje

4.1. Termometrijska kupka

Ispitivanje je provedeno na termometrijskoj kupki proizvođača „Heto Calibration“, interne laboratorijske oznake „TEKUP II“. Kupka se sastoji od više dijelova, a u svom sklopu ima ugrađenu jedinicu za grijanje i hlađenje, pa tako pokriva temperaturno područje od -20°C do 100°C . Radni medij se nalazi u cjevastom okviru zapremnine 4,5L, a miješalica osigurava stalnu cirkulaciju i miješanje vode. U nastavku na Slici 6 je prikazan izgled kupke, a u tablici njene tehničke karakteristike.



Slika 6. Termometrijska kupka "Heto Calibration KB 22-1"

Također, kupka je opremljena temperaturnim regulatorom „Calcon 2000“ koji je prikazan na Slici 7. Radi se o PID regulatoru visokih performansi s mikroprocesorskim upravljanjem kojim se temperatura može podešavati s korakom od 0,1 °C.



Slika 7. Regulator temperature "Calcon 2000"

Tablica 1. Osnovne karakteristike termometrijske kupke

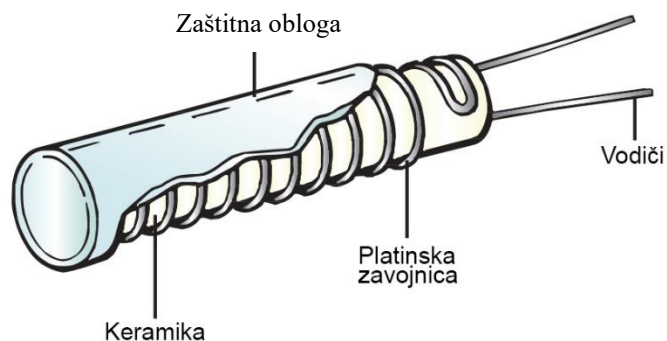
Proizvođač	Heto Calibration
Model	KB 22-2
Temperaturno područje	-20 °C do 100 °C
Volumen radnog medija	4,5 L (Ø100 x 450 mm)
Temperaturna stabilnost	< ±0.001 °C
Brzina hlađenja	cca. 11 °C·h ⁻¹
Brzina zagrijavanja	cca. 25 °C·h ⁻¹

4.2. Otpornički termometri

Za provođenje ispitivanja korišteni su etalonski otpornički osjetnici temperature internih laboratorijskih oznaka *TEPOT₂₀* (s.b. 2491) i *TEPOT₂₁* (s.b. 2493). Svojom oblikom predviđeni su za umetanje u ranije pripremljene provrte ili direktno u radni medij, a prilikom mjerenja razlika između promjera termometra i promjera provrta ne bi smjela biti veća od 2 mm. Ovi termometri rade u temperaturnom području od -200 °C do 661 °C, a osjetnik (Slika 9) je napravljen od platinske žice. Električni otpor osjetnika mjeri se pomoću otporničkog mosta s kojim su termometri povezani pomoću četiri žice. Na Slici 8 je prikazan izgled jednog takvog termometra, a u nastavku su tablično dane i njegove karakteristike.



Slika 8. Korišteni platinski otpornički termometri



Slika 9. Osjetnik platinskog otporničkog termometra

Tablica 2. Tehnički podaci platinskog otporničkog termometra

Proizvođač	Fluke/Hart Scientific
Model	5628
Nominalni otpor	25.5 Ω
Broj komada	2
Temperaturno područje	-200 °C do 661 °C
Nesigurnost umjeravanja	6 mK do 15 mK (u području -200 °C do 420 °C)
Dimenzije	Ø6.5 mm x 510 mm

4.3. Instrumenti za mjerenje električnog otpora osjetnika temperature – otpornički most

Princip rada otporničkih termometara se zasniva na činjenici da se električni otpor metalalnih vodiča mijenja s promjenom temperature. Izmjereni otpor termometra se preračunava u temperaturu na temelju unaprijed određene jednadžbe, čiji se koeficijenti određuju umjeravanjem termometra. Oprema za mjerenje otpora sastavljena je od sljedećih instrumenata:

- termometrijski otpornički most ASL F700 (interne oznake EOMOS03/03)
- multipleksor ASL 158 (interne oznake EOMOS03/01)
- komunikacijska i upravljačka jedinica multipleksora, ASL 148 (int. ozn. EOMOS03/02)

Za mjerenje otpora platinskih otporničkih termometara korišten je izmjenični otpornički most ASL F700 čiji je proizvođač ASL Limited. Ovaj most ima mogućnost mjeriti električne otpore

u rasponu od 0 Ω do 400 Ω s rezolucijom od 1 ppm dok je u kombinaciji s etalonskim otporom nazivnog otpora 100 Ω . Most ima jedan ulazni kanal za spajanje termometara. U nastavku, tablično su prikazane tehničke karakteristike otporničkog mosta kao i njegov prikaz na Slici 10.



Slika 10. Termometrijski otpornički most

Tablica 3. Tehnički podaci termometrijskog otporničkog mosta

Proizvođač	ASL	
Model	F700	
Napajanje	240/220/120/100 Vac	
Frekvencija	50 – 60 Hz	
Dimenzije	visina	155 mm
	širina	520 mm
	dužina	466 mm
Masa	15 kg	
Radni uvjeti	0 °C – 30 °C, 10 % - 90 % RH	
Vrijeme balansiranja	20 sekundi za potpuni balans	
Linearnost	< ±1 zadnja decimala (1 ppm)	
Točnost	0.25 mK puni raspon/ 6 mK do 1064 °C ovisno o otporu	

Pošto su za provedbu karakterizacije kupke korištena dva osjetnika temperature, oni su s termometrijskim otporničkim mostom povezani preko multipleksora i njegove upravljačke jedinice. Upotrebom multipleksora omogućeno je povezivanje obaju termometara na isti otpornički most. Korišteni multipleksor prikazan je na Slici 11, a njegove su specifikacije navedene u Tablici 4.



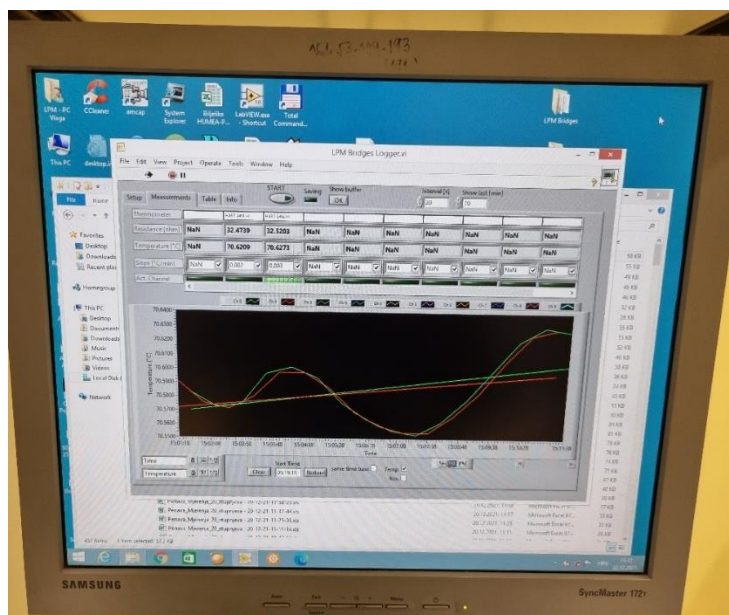
Slika 11. Multipleksor

Tablica 4. Tehničke specifikacije multipleksora

Proizvođač	ASL	
Model	SB 158	
Napajanje	220/240 Vac	
Frekvencija	47 – 63 Vac	
Dimenzije	Visina	88 mm
	Dužina	295 mm
	Širina	442 mm
Masa	7 kg	

4.4. Računalo i računalni programi

Za prikupljanje i obradu mjerenih podataka, kao i za upravljanje radom multipleksora korišten je program „LPM Bridges Logger“ izrađen unutar sučelja „LabView“. Program je razvijen u Laboratoriju za procesna mjerenja na FSB-u, te omogućava grafički i tablični prikaz mjerenih podataka te njihovo praćenje u određenom vremenskom intervalu, a također služi za statističku obradu podataka, podešavanje postavki mosta kao i preračunavanje otpora osjetnika u pripadajuće temperature. U programu eksplicitno možemo pratiti očitavanja otpora i temperature u vremenu, međutim potrebno je naglasiti da za ovo ispitivanje nije uzeta temperatura koju je ponudio program. Karakteristika termometara se s vremenom i korištenjem nešto promijenila pa su termometri podvrgnuti umjeravanju. Za očitani otpor, uz nove koeficijente, izračunata je točnija temperatura nego što je ponudio program sa starim koeficijentima termometra. Sučelje programa prikazano je na Slici 12.



Slika 12. Sučelje računalnog programa "LabView"

4.5. Oprema za praćenje uvjeta okoline

Za praćenje uvjeta okoline tijekom umjeravanja korišteno je mjerilo uvjeta okoliša internog naziva *TEOKO 09*. Ovim uređajem možemo pratiti temperaturu, tlak i vlagu u prostoriji. Korišteni uređaj prikazan je na Slici 13.



Slika 13. Uređaj za praćenje uvjeta okoline "Testo 176P1"

4.6. Ostala korištena oprema

Osim dosad navedenih, za ispitivanje kupke korišteno je i nekoliko drugih stavki.

Pošto je ispitivanje bilo potrebno provesti za temperature iznad 0 °C, kao radni medij korištena je obična voda iz slavine. U radni medij uronjen je prethodno opisani izotermalni blok koji u sebi ima provrte za umetanje termometara. Svi ovi podaci kao i zapisi o praćenju samog eksperimenta vođeni su u programu „Excel“.

Prilikom mjerenja aksijalnih temperaturnih gradijenata korišten je stalak s hvataljkom za termometar te metar za pravilno određivanje dubine uranjanja termometra. Stalak s držačem je prikazan na Slici 14.



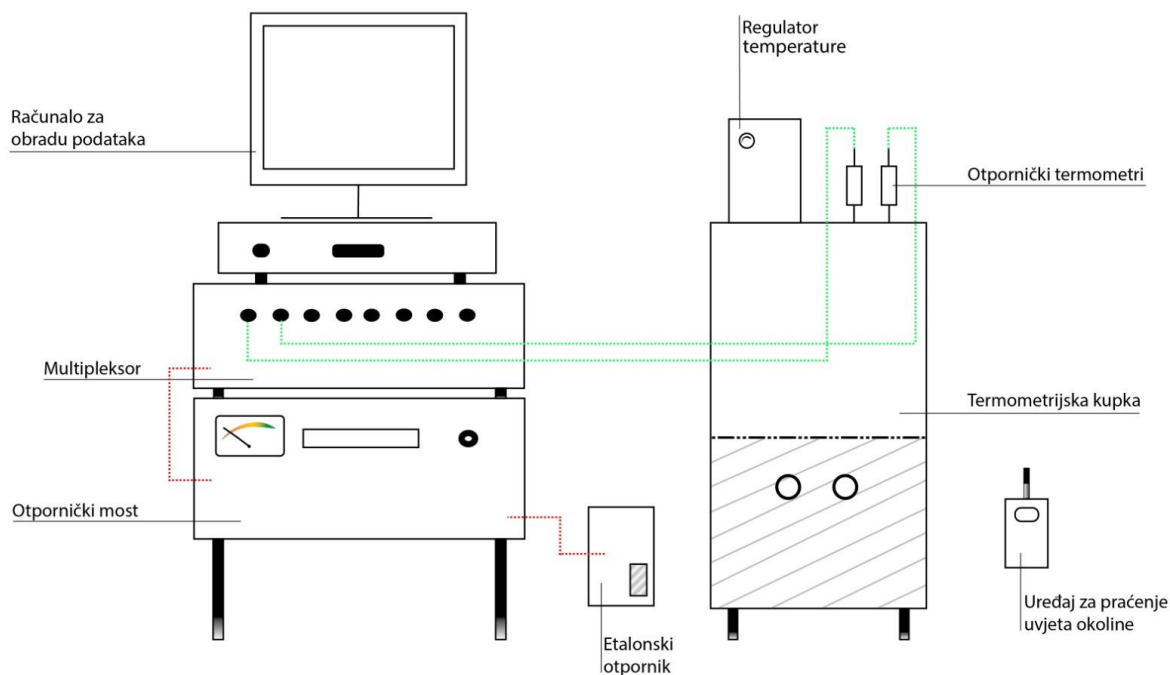
Slika 14. Stalak za ispitivanje aksijalnih temperaturnih gradijenata

5. POSTUPAK ODREĐIVANJA KARAKTERISTIKA ZONE KONTROLIRANE TEMPERATURE

Sva mjerenja potrebna za izradu ovog Završnog rada provedena su u Laboratoriju za procesna mjerenja na Fakultetu Strojарstva i Brodogradnje po interno osmišljenoj metodi „*TESTING OF ISOTHERMAL ZONES*“. Za određeni temperaturni raspon, ispitivanje mora biti provedeno u minimalno tri temperaturene točke (najviša, najniža i srednja temperatura). U sklopu ovog Završnog rada provedeno je ispitivanje u temperaturnom rasponu od 10 °C do 70 °C, u temperaturnim točkama: 10 °C, 20 °C, 30 °C, 50 °C i 70 °C. Postupak ispitivanja je takav da se na regulatoru temperature se namjesti željena temperatura te se nakon toga čeka 30 minutna radi postizanja i određivanja stabilnosti. Nakon toga, termometri mijenjaju svoja mjesta te se za svako slijedeće mjerenje čeka 10 minutna temperaturna stabilnost.

5.1. Postavljanje mjerne linije

Prije svega potrebno je sastaviti mjernu liniju. Ona je sastavljena od već navedenih i opisanih komponenata, a njena shema prikazana je na Slici 15. Unaprijed je potrebno odrediti temperaturene točke ispitivanja te izraditi skicu rasporeda prostornih točaka unutar radnog volumena kupke u kojima će se provoditi mjerenja.



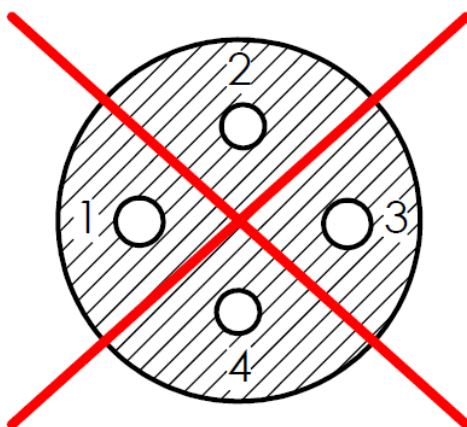
Slika 15. Opći prikaz mjerne linije

5.2. Praćenje uvjeta okoline

Za vrijeme mjerenja potrebno je konstantno pratiti okolišne uvjete koji vladaju u prostoriji. Tlak, temperaturu i vlažnost u prostoriji pratimo pomoću zasebnog uređaja. Za ispravno provođenje eksperimenta potrebno je da temperatura u prostoriji bude između 15 °C i 35 °C (oscilacije maksimalno 3 °C), a relativna vlažnost između 25 % RH i 75 % RH.

5.3. Određivanje radijalnih temperaturnih gradijenata

Na Slici 16 je prikazan tlocrt izotermalnog bloka korištenog za mjerenja. Za lakše praćenje daljnje razrade na skici su označeni provrti. Radijalni gradijenti se ispituju u četiri točke, pri čemu se jedan od provrta označava kao referentni. Dva termometra se postavljaju u provrte, od kojih je jedan referentan. Nakon 30-minutne stabilizacije temperature, termometri mijenjanju svoja mjesta i upravo se tako poništava pogreška uzrokovana odstupanjem jednog termometra u odnosu na drugi, a ta pogreška nastaje kao posljedica mjerne nesigurnosti njihovog umjeravanja te vremenske promjene njihovih karakteristika. Metoda zamjene termometara opisana je u literaturi [1]. U svakom daljnjem mjerenju jedan termometar ostaje u referentnom provrtu dok drugog premještamo u ostale provrte, a dostatno vrijeme stabilizacije je 10 minuta. Prilikom ovih mjerenja korištena su dva osjetnika temperature istog proizvođača i modela. Isti postupak primjenjujemo pri svakoj ispitnoj temperaturi.



Slika 16. Tlocrt izotermalnog bloka i oznake provrta u njemu

Očitanja termometra T_1 na poziciji R_1 možemo opisati kao temperaturu radnog medija na poziciji R_1 (ϑ_1), uvećanu za pogrešku tog termometra (E_1). Na isti način očitavanja termometra T_2 na poziciji R_2 možemo opisati kao temperaturu radnog medija na poziciji R_2 (ϑ_2), uvećanu za pogrešku termometra (E_2). Dakle:

$$\text{očitanje}_{T_1} = \vartheta_1 + E_1 \quad (2)$$

$$\text{očitanje}_{T_2} = \vartheta_2 + E_2 \quad (3)$$

Nakon zamjene pozicija termometara, njihova očitavanja mogu se izraziti kao:

$$\text{očitanje}_{T_1} = \vartheta_2 + E_1 \quad (4)$$

$$\text{očitanje}_{T_2} = \vartheta_1 + E_2 \quad (5)$$

Uvodeći pretpostavke da se temperature radnog medija na pozicijama R_1 i R_2 tijekom zamjene nisu mijenjale, kao što se nisu mijenjale niti međusobne pogreške termometara, kombiniranjem gornjih izraza, moguće je izvesti izraz za izračunavanje razlike temperatura radnog medija na pozicijama R_1 i R_2 (temperaturnog gradijenta):

$$\Delta\vartheta_{R1} = \vartheta_2 - \vartheta_1 = \frac{(\vartheta_2 + E_2) - (\vartheta_1 + E_1) + (\vartheta_2 + E_1) - (\vartheta_1 + E_2)}{2} \quad (6)$$

kao i izraz za izračunavanje međusobnog odstupanja termometara:

$$E_2 - E_1 = \frac{(\vartheta_2 + E_2) - (\vartheta_2 + E_1) + (\vartheta_1 + E_2) - (\vartheta_1 + E_1)}{2} \quad (7)$$

Pri daljnjem mjerenju, termometar T_2 ostaje u provrtu R_1 , a termometar T_1 premještamo u druge provrte. Ostali radijalni gradijenti izračunavaju se upotrebom jednadžbi:

$$\Delta\vartheta_{R2} = \vartheta_3 - \vartheta_1 = (\vartheta_3 + E_1) - (\vartheta_1 + E_2) + (E_2 - E_1) \quad (8)$$

$$\Delta\vartheta_{R3} = \vartheta_4 - \vartheta_1 = (\vartheta_4 + E_1) - (\vartheta_1 + E_2) + (E_2 - E_1) \quad (9)$$

$$\Delta\vartheta_{R4} = \vartheta_2 - \vartheta_3 = (\vartheta_2 - \vartheta_1) - (\vartheta_3 - \vartheta_1) \quad (10)$$

$$\Delta\vartheta_{R5} = \vartheta_2 - \vartheta_4 = (\vartheta_2 - \vartheta_1) - (\vartheta_4 - \vartheta_1) \quad (11)$$

$$\Delta\vartheta_{R6} = \vartheta_3 - \vartheta_4 = (\vartheta_3 - \vartheta_1) - (\vartheta_4 - \vartheta_1) \quad (12)$$

Kao rezultat određivanja radijalnih temperaturnih gradijenata na pojedinoj ispitnoj temperaturi daje se maksimalni temperaturni gradijent određen između bilo koje dvije promatrane radijalne pozicije:

$$\Delta\vartheta_R = |\max \Delta\vartheta_{Rx}|, x = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

Ovdje n predstavlja broj promatranih pozicija.

Za potrebe utvrđivanja doprinosa radijalnih gradijenata ukupnoj nesigurnosti umjeravanja termometara, ova se vrijednost prihvaća kao širina poluintervalu pripadnog doprinosa s pravokutnom razdiobom:

$$a_{RG} = \Delta\vartheta_R \quad (14)$$

Standardnu nesigurnost (normalna razdioba) zbog doprinosa radijalnih gradijenata može se tada izračunati pomoću jednadžbe:

$$u_{RG} = \frac{1}{\sqrt{3}} * a_{RG} \quad (15)$$

U prvom očitavanju gdje smo tražili temperaturnu stabilnost u periodu od 30 minuta, imali smo 45 očitavanja temperature, a sva ostala očitavanja su zahtijevala 10-minutnu stabilnost gdje smo imali 15 temperaturnih očitavanja. Temperatura na određenoj poziciji dobivena je tako da smo uzeli srednju vrijednost ovih očitavanja. Kao parametar za utvrđivanje stabilnih očitavanja termometara korišten je nagib pravca koji aproksimira očitavanja termometara u periodu od zadnjih 10 ili 30 minuta, a nagib pravca određen je linearnom regresijom metodom najmanjih kvadrata. Uvjet zadovoljavajuće stabilnosti predstavljao je nagib pravca manji ili jednak 1 mK u promatranom vremenskom periodu.

5.4. Određivanje aksijalnih temperaturnih gradijenata

Za određivanje aksijalnih gradijenata koristimo također 2 termometra, s tim da je jedan termometar, u ovom slučaju termometar T_2 , uronjen u provrt R_1 , dok je termometar T_1 u provrt R_4 . U početnoj fazi oba termometra se nalaze na poziciji $h=0\text{mm}$, tj. oba termometra svojim

vrhom diraju dno izotermalnog bloka. Mjerenje je provedeno u četiri točke s jednakim aksijalnim pomacima Termometra T_1 od 20 mm, dok je Termometar T_2 cijelo vrijeme u provrtu R_1 na $h=0$ mm i služi kao referenca. Visina ispitivane zone unutar izotermalnog bloka je iznosila 60 mm, a podaci su zabilježeni nakon 10-minutne stabilnosti na svakom koraku. U tom vremenskom intervalu zabilježeno je 15 temperaturnih očitavanja. Temperatura na određenoj poziciji dobivena je tako da smo uzeli srednju vrijednost ovih 15 očitavanja. Kao parametar za utvrđivanje stabilnih očitavanja termometara korišten je nagib pravca koji aproksimira očitavanja termometara u periodu od zadnjih 10 minuta. Nagib pravca određen je linearnom regresijom metodom najmanjih kvadrata. Uvjet zadovoljavajuće stabilnosti predstavljao je nagib pravca manji ili jednak 1 mK u promatranom vremenskom intervalu.

Temperaturni gradijenti između dva aksijalna položaja osjetnika temperature izračunavaju se pomoću sljedećih jednadžbi:

$$\Delta\vartheta_{A0} = \vartheta_{h0} - \vartheta_{RR} = (\vartheta_{h0} + E1) - (\vartheta_{RR} + E2) + (E2 - E1) \quad (16)$$

$$\Delta\vartheta_{A1} = \vartheta_{h1} - \vartheta_{RR} = (\vartheta_{h1} + E1) - (\vartheta_{RR} + E2) + (E2 - E1) \quad (17)$$

$$\Delta\vartheta_{A0-1} = \Delta\vartheta_{A1} - \Delta\vartheta_{A0} \quad (18)$$

Gdje je:

- $\Delta\vartheta_{AY}$ - razlika temperatura između pozicija R_X-h_Y i R_R (oznaka h se odnosi na vertikalni položaj osjetnika temperature)
- ϑ_{hY} - temperatura na poziciji R_X-h_Y
- ϑ_{RR} - temperatura na referentnoj poziciji R_R
- ϑ_{A0-1} - vertikalni temperaturni gradijent između dvaju promatranih vertikalnih pozicija na istoj radijalnoj poziciji

Iz gornjih jednadžbi se može primijetiti da kod određivanja vertikalnih gradijenata korekcija s obzirom na međusobno odstupanje termometara na istoj temperaturi nije potrebna, budući da se korekcije $(E2 - E1)$ poništavaju kod oduzimanja prvih dvaju izraza.

Kao rezultat određivanja aksijalnih temperaturnih gradijenata na pojedinoj ispitnoj temperaturi daje se maksimalni temperaturni gradijent određen između bilo koje dvije promatrane aksijalne pozicije:

$$\Delta\vartheta_A = |\max(\Delta\vartheta_{A0-Y}) - \min(\Delta\vartheta_{A0-Y})|, Y = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

Ovdje n predstavlja broj promatranih aksijalnih pozicija.

Za potrebe utvrđivanja doprinosa aksijalnih gradijenata ukupnoj nesigurnosti umjeravanja termometara, ova se vrijednost prihvaća kao širina poluintervalala pripadnog doprinosa s pravokutnom razdiobom:

$$a_{AG} = \Delta\vartheta_A \quad (20)$$

Standardnu nesigurnost (normalna razdioba) zbog doprinosa aksijalnih gradijenata može se tada izračunati pomoću jednadžbe:

$$u_{AG} = \frac{1}{\sqrt{3}} * a_{AG} \quad (21)$$

5.5. Temperaturna stabilnost

Temperaturna stabilnost se određuje na način da se u bilo koji od provrta R_X (uključujući i R_R) postavi osjetnik temperature, te se nakon stabilizacije očitavanja pripadnih temperatura analiziraju oscilacije temperature u željenom vremenskom periodu. U mjeriteljstvu je uobičajeno određivanje stabilnosti u vremenskom periodu od 30 minuta.

Temperaturna stabilnosti na pojedinoj ispitnoj temperaturi izražava se kao maksimalna uočena razlika temperatura u promatranom periodu (30 minuta, „*peak to peak*“):

$$\Delta t_S = |t_{max} - t_{min}|_{30 \text{ min}} \quad (22)$$

Za potrebe utvrđivanja doprinosa temperaturne nestabilnosti ukupnoj nesigurnosti umjeravanja termometara, ova se vrijednost prihvaća kao širina intervalala pripadnog doprinosa s pravokutnom razdiobom:

$$2 \cdot a_S = \Delta\vartheta_S \quad (23)$$

Standardnu nesigurnost (normalna razdioba) zbog doprinosa temperaturne nestabilnosti može se tada izračunati pomoću jednadžbe:

$$u_S = \frac{1}{2\sqrt{3}} * 2 \cdot a_S \quad (24)$$

5.6. Ukupni doprinos mjernoj nesigurnosti

Nakon što se uz pomoć eksperimenata i matematičkih izračuna odrede radijalni i aksijalni temperaturni gradijenti kao i temperaturna stabilnost unutar promatranog dijela radnog volumena kupke, ukupan standardni doprinos nesigurnosti zbog neidealnih karakteristika kupke može se izračunati pomoću jednadžbe:

$$u_{(k=1)} = \sqrt{u_{RG}^2 + u_{AG}^2 + u_S^2} \quad (25)$$

6. REZULTATI ISPITIVANJA KUPKE

Ispitivanje karakteristika termometrijske kupke provedeno je u periodu od 16.12.2021. do 22.12.2021., a za njegovu provedbu bila su potrebna četiri dana. Ispitivanje je provedeno na slijedećim temperaturama: 10 °C, 20°C, 30°C, 50 °C i 70 °C. U nastavku je dan tablični i grafički prikaz rezultata.

6.1. Uvjeti okoliša

Uvjeti okoliša za vrijeme realizacije eksperimenata su bili slijedeći:

Tablica 5. Uvjeti okoliša za vrijeme ispitivanja

Datum ispitivanja	Ispitna temperatura	Temperatura okoliša, °C	Relativna vlažnost, %	Tlak, bar
16.12.2021.	10 °C	25,82	21,02	1,002
20.12.2021.	20 °C i 30 °C	24,00	20,82	1,009
21.12.2021.	50 °C	24,98	18,65	1,013
22.12.2021.	70 °C	25,08	17,37	1,014

6.2. Radijalni temperaturni gradijenti

6.2.1. Radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od 10°C

Tablica 6. Eksperimentalno određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 10 °C

Očitavanja T_2 , °C		Očitavanja T_1 , °C		Radijalni gradijenti, °C
R_1 (R_R)	R_2	R_3	R_4	
9,9913	9,9916			0,0003
9,9984		9,9972		0,0017
9,9982			9,9976	0,0011

Tablica 7. Matematički određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 10 °C

Radijalni gradijenti, °C	
$R_2 - R_3$	-0,0014
$R_2 - R_4$	-0,0008
$R_3 - R_4$	0,0006

Tablica 8. Najveći radijalni gradijent na ispitnoj temperaturi 10 °C

Pozicije	Radijalni gradijent $\Delta\vartheta_R$, mK	Standardna nesigurnost u_{RG} , mK
R_1-R_3	1,7	1,0

6.2.2. Radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od 20°C

Tablica 9. Eksperimentalno određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 20 °C

Očitavanja T_2 , °C	Očitavanja T_1 , °C			Radijalni gradijenti, °C
$R_1 (R_R)$	R_2	R_3	R_4	
20,0681	20,0695			0,0014
20,0525		20,0526		0,0006
20,0752			20,0748	0,0002

Tablica 10. Matematički određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 20 °C

Radijalni gradijenti, °C	
$R_2 - R_3$	0,0008
$R_2 - R_4$	0,0012
$R_3 - R_4$	0,0004

Tablica 11. Najveći radijalni gradijent na ispitnoj temperaturi 20 °C

Pozicije	Radijalni gradijent $\Delta\vartheta_R$, mK	Standardna nesigurnost u_{RG} , mK
R_1-R_2	1,4	0,8

6.2.3. Radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od 30°C

Tablica 12. Eksperimentalno određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 30 °C

Očitavanja T_2 , °C		Očitavanja T_1 , °C		Radijalni gradijenti, °C
R_1 (R_R)	R_2	R_3	R_4	
30,1972	30,1985			0,0013
30,1886		30,1884		-0,0000
30,1924			30,1907	-0,0015

Tablica 13. Matematički određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 30 °C

Radijalni gradijenti, °C	
$R_2 - R_3$	0,0013
$R_2 - R_4$	0,0027
$R_3 - R_4$	0,0014

Tablica 14. Najveći radijalni gradijent na ispitnoj temperaturi 30 °C

Pozicije	Radijalni gradijent $\Delta\vartheta_R$, mK	Standardna nesigurnost u_{RG} , mK
R_2-R_4	2,7	1,6

6.2.4. Radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od 50°C

Tablica 15. Eksperimentalno određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 50 °C

Očitavanja T_2 , °C		Očitavanja T_1 , °C		Radijalni gradijenti, °C
R_1 (R_R)	R_2	R_3	R_4	
50,3457	50,3456			-0,0001
50,3368		50,3349		-0,0034
50,3279			50,3250	-0,0045

Tablica 16. Matematički određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 50 °C

Radijalni gradijenti, °C	
$R_2 - R_3$	0,0033
$R_2 - R_4$	0,0044
$R_3 - R_4$	0,0011

Tablica 17. Najveći radijalni gradijent na ispitnoj temperaturi 50 °C

Pozicije	Radijalni gradijent $\Delta\vartheta_R$, mK	Standardna nesigurnost u_{RG} , mK
R_1-R_4	4,5	2,6

6.2.5. Radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od 70°C**Tablica 18. Eksperimentalno određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 70 °C**

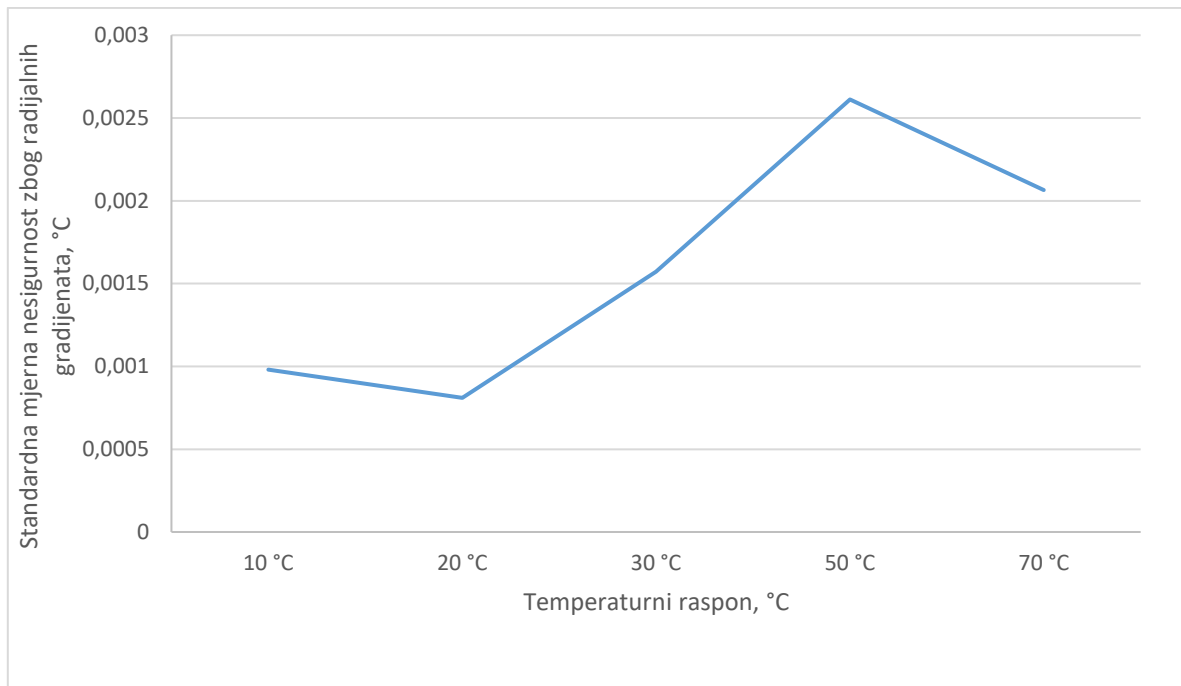
Očitavanja T_2 , °C		Očitavanja T_1 , °C		Radijalni gradijenti, °C
R_1 (R_R)	R_2	R_3	R_4	
70,7046	70,7058			0,0012
70,5172		70,5152		-0,0003
70,4952			70,4911	-0,0024

Tablica 19. Matematički određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 70 °C

Radijalni gradijenti, °C	
$R_2 - R_3$	0,0015
$R_2 - R_4$	0,0036
$R_3 - R_4$	0,0020

Tablica 20. Najveći radijalni gradijent na ispitnoj temperaturi 70 °C

Pozicije	Radijalni gradijent $\Delta\vartheta_R$, mK	Standardna nesigurnost u_{RG} , mK
R_2-R_4	3,6	2,1



Dijagram 1. Standardne mjerne nesigurnosti zbog radijalnih temperaturnih gradijenata

6.3. Aksijalni temperaturni gradijenti

6.3.1. Aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od 10°C

Tablica 21. Eksperimentalno određeni aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 10 °C

Termometar $T_2 - TEPOT_{21} - R_1 (R_R)$ Termometar $T_1 - TEPOT_{20} - R_4$					
Očitavanja $T_2, ^\circ\text{C}$	Očitavanja $T_1, ^\circ\text{C}$				Aksijalni gradijent, $^\circ\text{C}$
$h=0$ mm	$h=0$ mm	$h=20$ mm	$h=40$ mm	$h=60$ mm	
9,9982	9,9976				
9,9991		9,9987			-0,0015
10,0006			10,0002		-0,0015
10,0037				10,0031	-0,0017
Najveći doprinos u dijelu vertikalnog raspona od 0 do 60 mm				Aksijalni gradijent $\Delta\vartheta_A, \text{mK}$	1,7
				Standardna nesigurnost u_{AG}, mK	1,0

6.3.2. Aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od 20°C

Tablica 22. Eksperimentalno određeni aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 20 °C

Termometar $T_2 - TEPOT_{21} - R_1 (R_R)$ Termometar $T_1 - TEPOT_{20} - R_4$					
Očitavanja $T_2, ^\circ\text{C}$	Očitavanja $T_1, ^\circ\text{C}$				Aksijalni gradijent, $^\circ\text{C}$
$h=0$ mm	$h=0$ mm	$h=20$ mm	$h=40$ mm	$h=60$ mm	
20,0752	20,0748				
20,0504		20,0495			-0,0010
20,0503			20,0496		-0,0009
20,0474				20,0468	-0,0008
Najveći doprinos u dijelu vertikalnog raspona od 0 do 60 mm				Aksijalni gradijent $\Delta\vartheta_A, \text{mK}$	1,0
				Standardna nesigurnost u_{AG}, mK	0,6

6.3.3. Aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od 30°C

Tablica 23. Eksperimentalno određeni aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 30 °C

Termometar $T_2 - TEPOT_{21} - R_1 (R_R)$ Termometar $T_1 - TEPOT_{20} - R_4$					
Očitavanja $T_2, ^\circ\text{C}$	Očitavanja $T_1, ^\circ\text{C}$				Aksijalni gradijent, $^\circ\text{C}$
$h=0$ mm	$h=0$ mm	$h=20$ mm	$h=40$ mm	$h=60$ mm	
30,1924	30,1907				
30,1873		30,1864			-0,0005
30,1869			30,1863		-0,0009
30,1884				30,1877	-0,0008
Najveći doprinos u dijelu vertikalnog raspona od 0 do 60 mm				Aksijalni gradijent $\Delta\vartheta_A, \text{mK}$	0,9
				Standardna nesigurnost u_{AG}, mK	0,5

6.3.4. Aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od 50°C

Tablica 24. Eksperimentalno određeni aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 50 °C

Termometar $T_2 - TEPOT_{21} - R_1 (R_R)$ Termometar $T_1 - TEPOT_{20} - R_4$					
Očitavanja $T_2, ^\circ\text{C}$	Očitavanja $T_1, ^\circ\text{C}$				Aksijalni gradijent, $^\circ\text{C}$
$h=0$ mm	$h=0$ mm	$h=20$ mm	$h=40$ mm	$h=60$ mm	
50,3279	50,3250				
50,3435		50,3405			-0,0015
50,3599			50,3563		-0,0009
50,3646				50,3626	-0,0025
Najveći doprinos u dijelu vertikalnog raspona od 0 do 60 mm				Aksijalni gradijent $\Delta\vartheta_A, \text{mK}$	2,5
				Standardna nesigurnost u_{AG}, mK	1,5

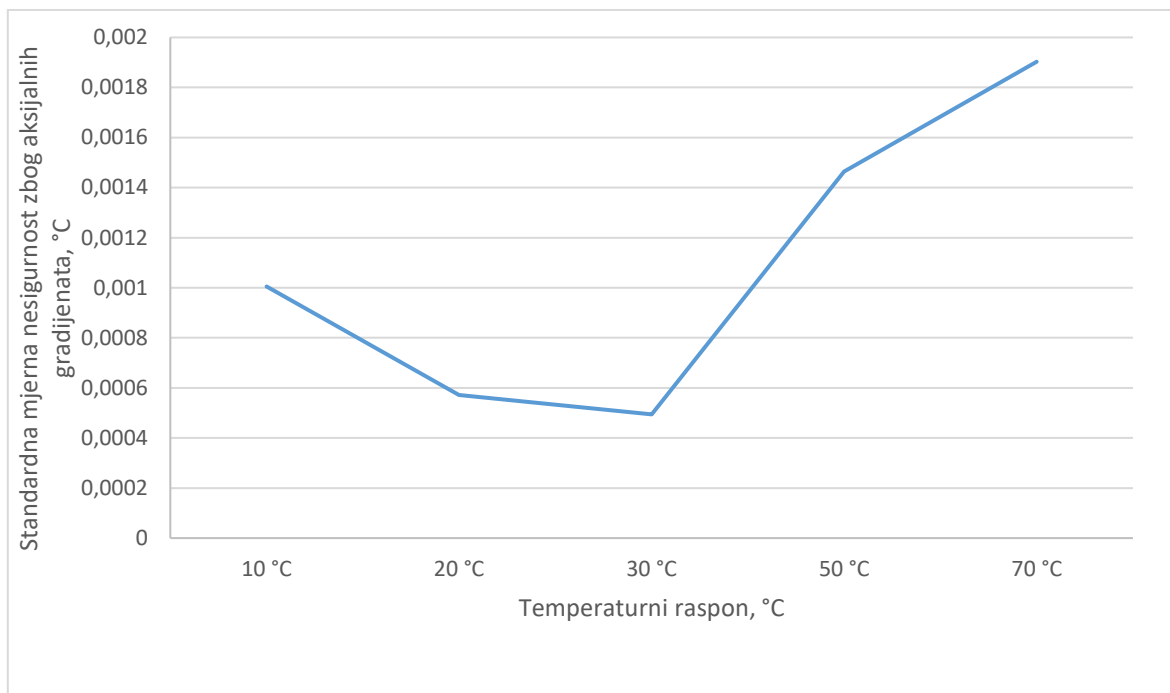
6.3.5. Aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od 70°C

Tablica 25. Eksperimentalno određeni aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 70 °C

Termometar $T_2 - TEPOT_{21} - R_1 (R_R)$ Termometar $T_1 - TEPOT_{20} - R_4$					
Očitavanja $T_2, ^\circ\text{C}$	Očitavanja $T_1, ^\circ\text{C}$				Aksijalni gradijent, $^\circ\text{C}$
$h=0$ mm	$h=0$ mm	$h=20$ mm	$h=40$ mm	$h=60$ mm	
70,4952	70,4911				
70,5459		70,5430			-0,0006
70,5899			70,5843		-0,0033
70,6159				70,6131	-0,0004
Najveći doprinos u dijelu vertikalnog raspona od 0 do 60 mm				Aksijalni gradijent $\Delta\vartheta_A, \text{mK}$	3,3
				Standardna nesigurnost u_{AG}, mK	1,9

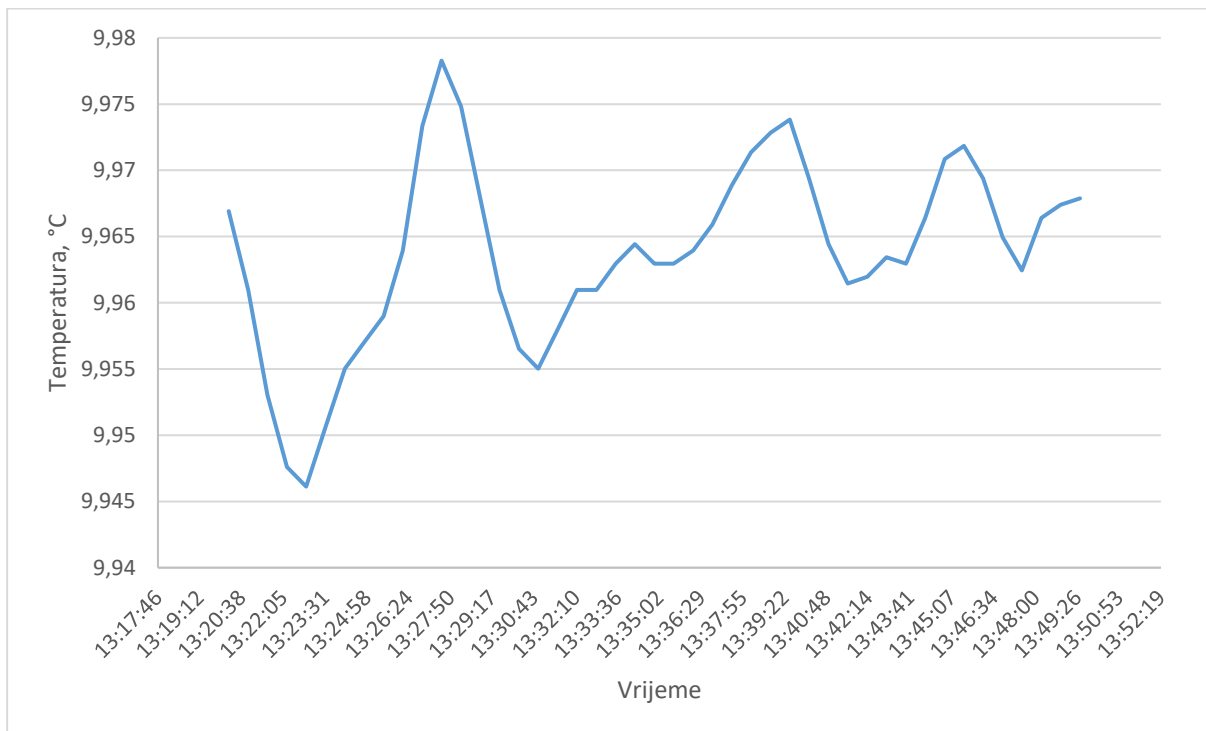
Tablica 26. Standardna mjerna nesigurnost zbog aksijalnih gradijenata

Ispitna temperatura, $^\circ\text{C}$	Poluinterval pravokutne razdiobe a, mK	Standardna nesigurnost u, mK
10	1,7	1,0
20	1,0	0,6
30	0,9	0,5
50	2,5	1,5
70	3,3	1,9

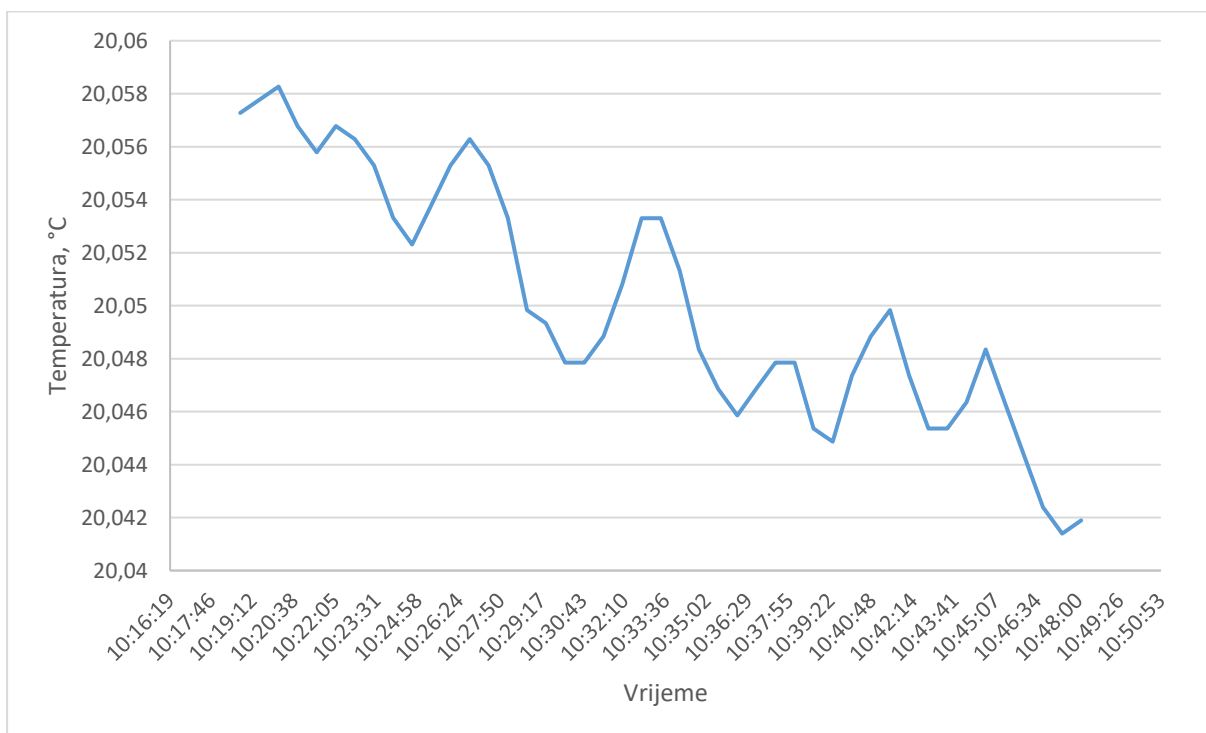


Dijagram 2. Standardne mjerne nesigurnosti zbog aksijalnih temperaturnih gradijenata

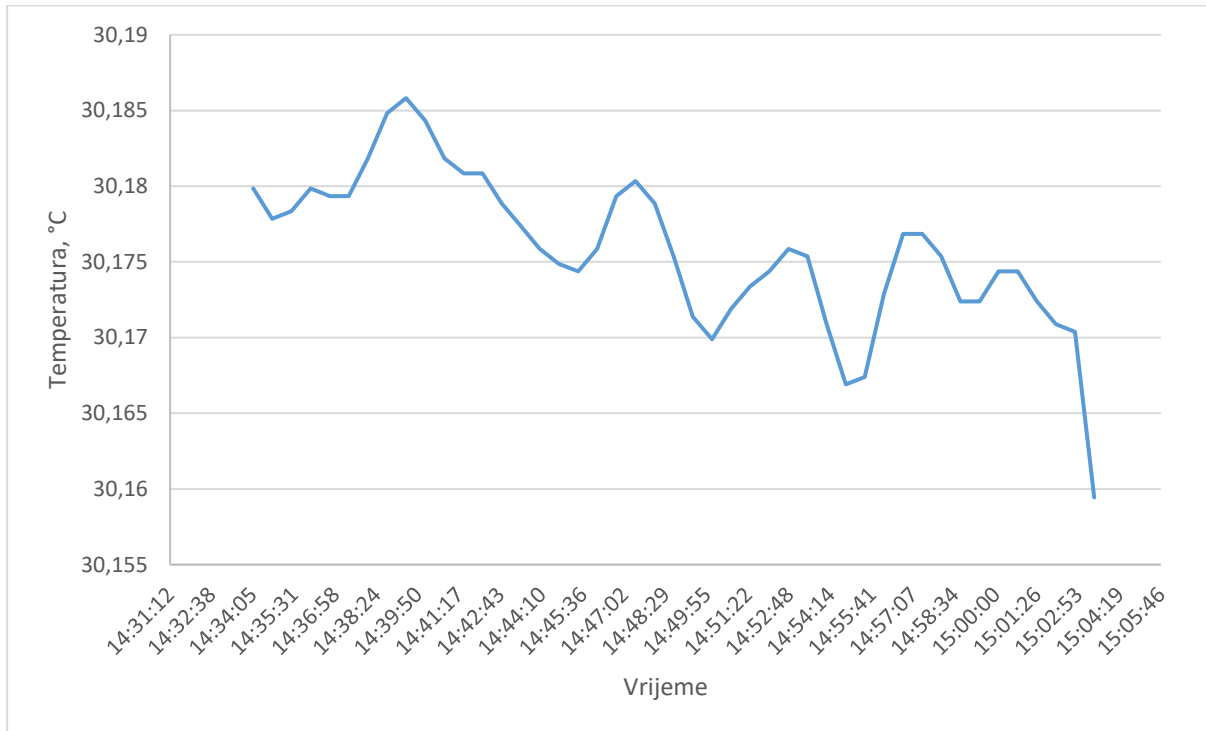
6.4. Stalnost temperature



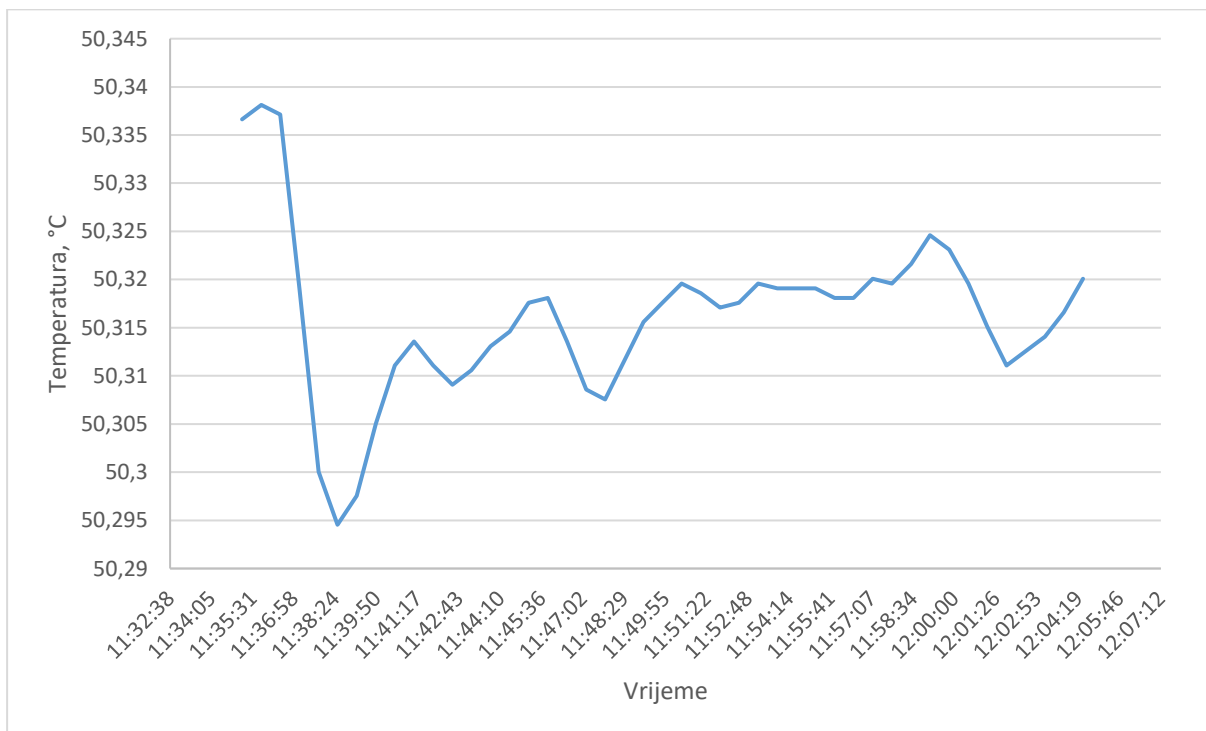
Dijagram 3. 30-minutna stabilnost temperature u ispitnoj točki 10 °C



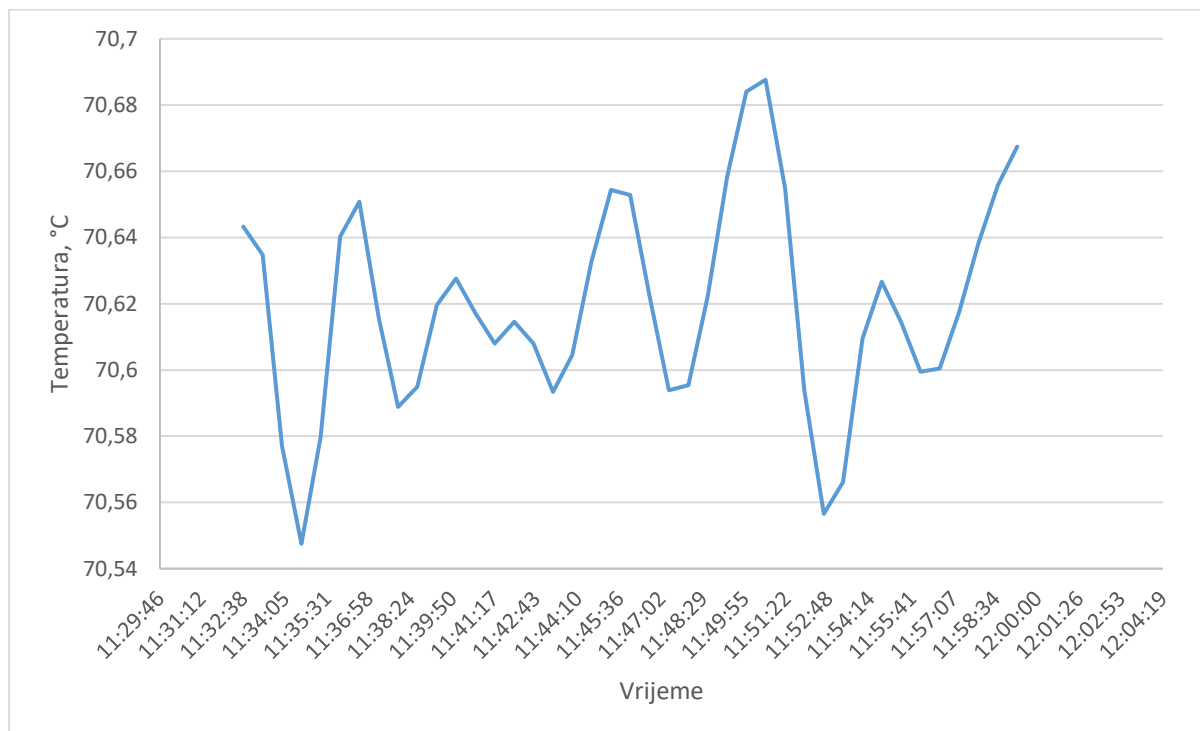
Dijagram 4. 30-minutna stabilnost temperature u ispitnoj točki 20 °C



Dijagram 5. 30-minutna stabilnost temperature u ispitnoj točki 30 °C



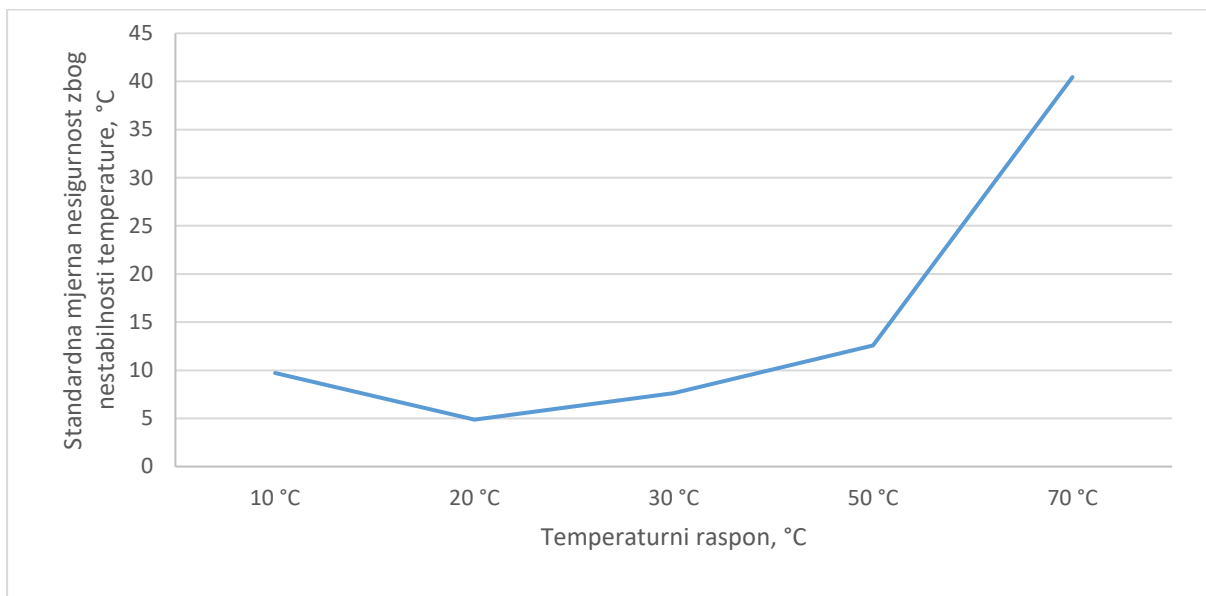
Dijagram 6. 30-minutna stabilnost temperature u ispitnoj točki 50 °C



Dijagram 7. 30-minutna stabilnost temperature u ispitnoj točki 70 °C

Tablica 27. Standardna mjerna nesigurnost zbog nestabilnosti temperature

Ispitna temperatura, °C	Poluinterval pravokutne razdiobe a_s , mK	Standardna nesigurnost u_s , mK
10	16,8	9,7
20	8,4	4,9
30	13,2	7,6
50	21,8	12,6
70	70,1	40,4

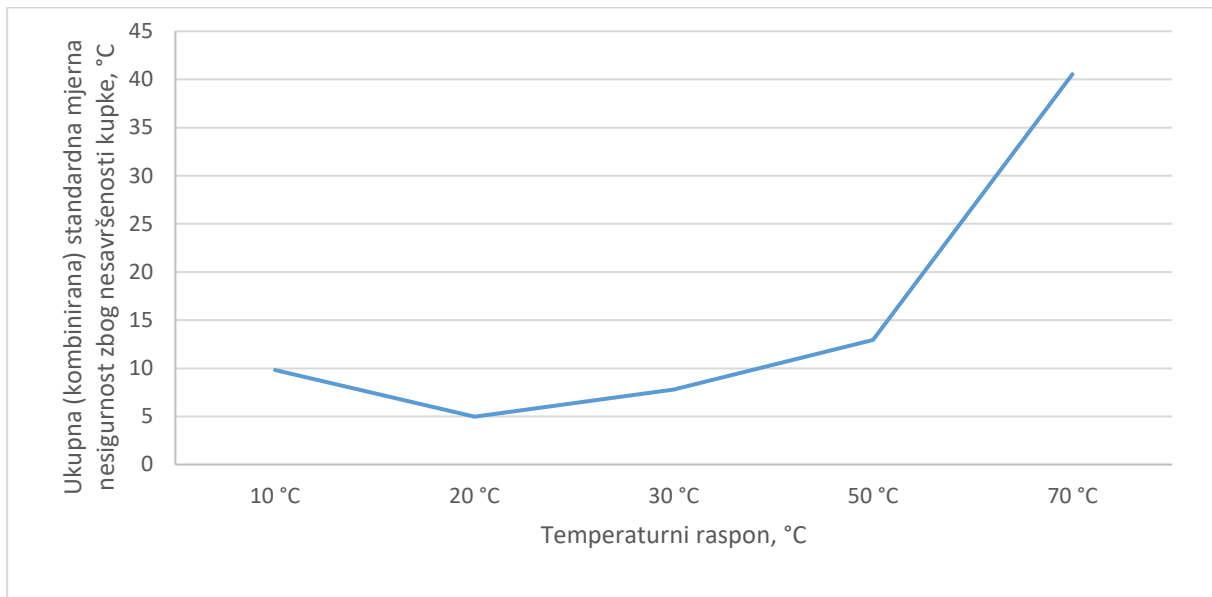


Dijagram 8. Standardne mjerne nesigurnosti zbog nestabilnosti temperature

6.5. Ukupna mjerna nesigurnost

Tablica 28. Ukupna (kombinirana) standardna mjerna nesigurnost zbog nesavršenosti kupke

Temperatura, °C	10	20	30	50	70
Standardna nesigurnost zbog radialnih gradijenata u_{RG} ($k=1$), mK	1,0	0,8	1,6	2,6	2,1
Standardna nesigurnost zbog aksijalnih gradijenata u_{AG} ($k=1$), mK	1,0	0,6	0,5	1,5	1,9
Standardna nesigurnost zbog nestabilnosti temperature u_S ($k=1$), mK	9,7	4,9	7,6	12,6	40,4
Ukupna standardna nesigurnost zbog nesavršenosti kupke u ($k=1$), mK	9,8	5,0	7,8	12,9	40,5



Dijagram 9. Ukupna (kombinirana) standardna mjerna nesigurnost zbog nesavršenosti kupke

7. Zaključak

U sklopu Laboratorija za procesna mjerenja na Fakultetu Strojарstva i Brodogradnje, primjenjujući internu metodu, provedeno je ispitivanje karakteristika termometrijske kupke u temperaturnom području od 10 °C do 70 °C, u temperaturnim točkama 10 °C, 20 °C, 30 °C, 50 °C i 70 °C. U svrhu ispitivanja sastavljena je mjerna linija koja se sastojala od slijedećih elemenata: termometrijska kupka, dva otpornička termometra, otpornički most, multipleksor, računalo za obradu podataka te uređaj za praćenje uvjeta okoliša. Ovim ispitivanjem dobiven je uvid o mjernim nesigurnostima temperatura ostvarenih u radnom volumenu termometrijske kupke, koje su posljedica njene nesavršenosti. Rezultati ispitivanja prikazani su u sklopu rada, a koristiti će se prilikom budućih umjeravanja termometara u navedenoj kupki.

Analizirajući dobivene podatke, može se vidjeti da dominantan utjecaj na mjernu nesigurnost ima utjecaj nestabilnosti temperature. Ukupna nesigurnost kupke nalazi se u području od 5 mK (za ispitnu temperaturu 20 °C) do 40,5 mK (za ispitnu temperaturu 70 °C). Rezultati pokazuju da je najmanja mjerna nesigurnost za temperaturu 20 °C, a snižavanjem, odnosno povećavanjem temperature, raste i mjerna nesigurnost. Na temelju uvida u rezultate može se zaključiti da su karakteristike kupke dobre te je ona prihvatljiva za usporedbena umjeravanja preciznih termometara.

LITERATURA

- [1] Danijel Šestan, Antun Jugović: Evaluation of calibration bath with two precision thermometers, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [2] Testing of isothermal zones, Laboratorij za procesna mjerenja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [3] Nikola Radman: Ispitivanje karakteristika zona kontrolirane temperature, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [4] Antun Galović: Termodinamika II, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2003.
- [5] Josip Aščić: Ispitivanje karakteristika niskotemperaturne kupke, završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2021.
- [6] Evaluation of baths and furnances, Laboratorij za procesna mjerenja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.

PRILOZI

I. CD-R disc