

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Josip Aščić

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Josip Aščić

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se svome mentoru, doc. dr. sc. Danijelu Šestanu na pruženoj pomoći i stručnim savjetima tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se asistentu Ivanu Matasu na pomoći prilikom izrade praktičnog dijela završnog rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima na pruženoj podršci i razumijevanju tijekom dosadašnjeg dijela studija.

Josip Aščić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Josip Ašćić** Mat. br.: **0035212396**

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

Naslov rada na engleskom jeziku: **Characterization of low-temperature liquid bath**

Opis zadatka:

Potrebno je definirati i provesti postupak ispitivanja karakteristika niskotemperaturne kupke punjene etanolom, u temperaturnom području od $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Niskotemperaturna kupka se koristi u Laboratoriju za procesna mjerenja za provođenje usporedbenih umjeravanja termometara kao i za održavanje stabilne temperature saturatora primarnog niskotemperaturnog generatora vlažnosti. Ispitnim postupkom potrebno je obuhvatiti parametre koji imaju utjecaj na nesigurnost usporedbenog umjeravanja termometara u predmetnoj kupki.

U radu je potrebno:

- 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 radnom volumenu kupke.
- Izraditi shematski prikaz mjerne linije za provedbu ispitivanja, pri čemu je linija sastavljena od instrumenata i pomoćne opreme koja je na raspolaganju u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje (FSB-LPM).
- Priložiti rezultate ispitivanja s određenim doprinosima niskotemperaturne kupke ukupnoj mjernoj nesigurnosti, kada se ona koristi za umjeravanje termometara.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
30. studenoga 2020.

Datum predaje rada:
1. rok: 18. veljače 2021.
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Zadatak zadao:

Šestan

Doc. dr. sc. Danijel Šestan

Predsjednik Povjerenstva:

V Soldo

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. Općenito o ispitivanju karakteristika termostatiranih kupki.....	2
2.1. Niskotemperaturna kupka.....	4
2.2. Temperaturni gradijenti.....	5
3. Zona umjeravanja	6
3.1. Izotermalni blok	6
3.2. Kupka bez izotermalnog bloka.....	8
4. Karakteristike zona kontrolirane temperature	9
4.1. Određivanje radijalnih temperaturnih gradijenata.....	9
4.2. Određivanje aksijalnih temperaturnih gradijenata.....	11
4.3. Temperaturna stabilnost.....	14
4.4. Ukupni doprinos mjernoj nesigurnosti	14
5. Korištena oprema.....	15
5.1. Termometrijska kupka	16
5.2. Osjetnici temperature	17
5.3. Instrumenti za mjerenje električnog otpora osjetnika temperature	18
5.4. Računalo i akvizicijski programi	20
6. Postupak ispitivanja.....	21
6.1. Ispitne temperature.....	21
6.2. Uvjeti okoliša.....	22
6.3. Priprema mjerenja	22
7. Rezultati ispitivanja	23
7.1. Radijalni temperaturni gradijenti	23
7.1.1. Radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od -70 °C.....	23
7.1.2. Radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od -50 °C.....	24
7.1.3. Radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od -30 °C.....	25

7.1.4.	Radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$	26
7.1.5.	Radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od $10\text{ }^{\circ}\text{C}$	27
7.2.	Aksijalni temperaturni gradijenti.....	28
7.2.1.	Aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$	28
7.2.2.	Aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$	29
7.2.3.	Aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$	29
7.2.4.	Aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$	30
7.2.5.	Aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od $10\text{ }^{\circ}\text{C}$	30
7.3.	Stalnost temperature.....	32
7.4.	Ukupna mjerna nesigurnost.....	36
8.	Zaključak.....	37
LITERATURA.....		38

POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz temperaturnih gradijenata	5
Slika 2. Primjer izotermalnog bloka termostiranih kupki.....	6
Slika 3. Mogući položaji termometara tijekom ispitivanja temperaturnih gradijenata u radnom volumenu zone kontrolirane temperature	7
Slika 4. Primjer opisivanja geometrije ispitivane zone i mjernih pozicija termometara tijekom ispitivanja	8
Slika 5. Primjer opisivanja geometrije ispitivane zone i mjernih pozicija termometara tijekom ispitivanja	9
Slika 6. Opći prikaz mjerne linije.....	15
Slika 7. Kupka Kambič OB - 50 LT.....	16
Slika 8. Platinski otpornički termometar	17
Slika 9. Termometrijski otpornički most.....	18
Slika 10. Multipleksor	19
Slika 11. Prikaz sučelja LPM-ovog programa za očitavanje i pohranjivanje podataka izmjerenih termometrijskim otporničkim mostom	20

POPIS TABLICA

Tablica 1. Osnovne karakteristike termometrijske kupke	17
Tablica 2. Tehnički podaci platinskog otporničkog termometra	18
Tablica 3. Tehnički podaci termometrijskog otporničkog mosta	19
Tablica 4. Tehničke specifikacije multipleksora	20
Tablica 5. Eksperimentalno određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi -70 °C.....	23
Tablica 6. Matematički određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi -70 °C.....	23
Tablica 7. Najveći radijalni gradijent na ispitnoj temperaturi -70 °C	23
Tablica 8. Eksperimentalno određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi -50 °C.....	24
Tablica 9. Matematički određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi -50 °C.....	24
Tablica 10. Najveći radijalni gradijent na ispitnoj temperaturi -50 °C	24
Tablica 11. Eksperimentalno određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi -30 °C.....	25
Tablica 12. Matematički određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi -30 °C.....	25
Tablica 13. Najveći radijalni gradijent na ispitnoj temperaturi -30 °C	25
Tablica 14. Eksperimentalno određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi -10 °C.....	26
Tablica 15. Matematički određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi -10 °C.....	26
Tablica 16. Najveći radijalni gradijent na ispitnoj temperaturi -10 °C	26
Tablica 17. Eksperimentalno određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 10 °C	27
Tablica 18. Matematički određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 10 °C.....	27
Tablica 19. Najveći radijalni gradijent na ispitnoj temperaturi 10 °C.....	27
Tablica 20. Eksperimentalno određeni aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi -70 °C.....	28
Tablica 21. Eksperimentalno određeni aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi -50 °C.....	29
Tablica 22. Eksperimentalno određeni aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi -30 °C.....	29
Tablica 23. Eksperimentalno dobiveni aksijalni gradijenti za temperaturu -10 °C.....	30
Tablica 24. Eksperimentalno određeni aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 10 °C	30
Tablica 25. Standardna mjerna nesigurnost zbog aksijalnih gradijenata.....	31
Tablica 26. Standardna mjerna nesigurnost zbog nestabilnosti temperature.....	34
Tablica 27. Ukupna (kombinirana) standardna mjerna nesigurnost zbog nesavršenosti kupke	36

POPIS DIJAGRAMA

Dijagram 1. Standardne mjerne nesigurnosti zbog radijalnih temperaturnih gradijenata	28
Dijagram 2. Standardne mjerne nesigurnosti zbog aksijalnih temperaturnih gradijenata	31
Dijagram 3. 30-minutna stabilnost temperature u ispitnoj točki -70 °C	32
Dijagram 4. 30-minutna stabilnost temperature u ispitnoj točki -50 °C	32
Dijagram 5. 30-minutna stabilnost temperature u ispitnoj točki -30 °C	33
Dijagram 6. 30-minutna stabilnost temperature u ispitnoj točki -10 °C	33
Dijagram 7. 30-minutna stabilnost temperature u ispitnoj točki 10 °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 pouzdanosti od 68 %
h	mm	Vertikalni položaj osjetnika temperature u odnosu na najnižu poziciju unutar promatranog dijela radnog volumena kupke
%RH	-	relativna vlažnost zraka
RR	-	oznaka referentnog horizontalnog položaja osjetnika temperature unutar promatranog dijela radnog volumena kupke, $R=1$
RX	-	oznaka nerefentnog horizontalnog položaja osjetnika temperature unutar promatranog dijela radnog volumena kupke, $X=2, 3, \dots, n$
TEPOT n	-	interna laboratorijska oznaka platinskog otporničkog osjetnika temperature, $n=21, 22$
Tn	-	oznaka termometra

SAŽETAK

Svrha ovog završnog rada je ispitivanje karakteristike niskotemperaturne kupke, koja je ispunjena etanolom, u temperaturnom rasponu od $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, a koja će služiti u svrhu umjeravanja termometara. U sklopu završnog rada odrediti će se parametri koji imaju utjecaj na mjernu nesigurnost prilikom naknadnog usporednog umjeravanja termometara u promatranoj kupki. Ispitivanjem je obuhvaćeno određivanje radijalnih i aksijalnih gradijenata i temperaturna stabilnost, a provodi se prema metodi Laboratorija za procesna mjerenja, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Metoda ispitivanja je opisana i objašnjena uz pripadajuće parametre i formule. Dobiveni rezultati ispitivanja su prikazani tablično, te je uz njih također opisana korištena oprema kao i sami postupak mjerenja.

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

SUMMARY

This bachelor's thesis aims to describe the experimental examination of characteristics of the low-temperature thermostated bath, which uses ethanol as a working fluid, in the temperature range from $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. The bath is normally used as a zone of controlled temperature for calibration of thermometers by comparison. As part of this paper, parameters will be determined that have an impact on measurement uncertainty during the comparison calibration of the thermometers in the observed bath. These parameters include axial temperature gradients, radial temperature gradients, and temperature stability. The experimental work and analysis of the results are conducted by the procedures commonly used in the Laboratory of Process Measurements at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb. The used equipment, characterization procedure, and related data analysis are described and explained, and relevant parameters and formulas are given together with the graphical and tabular representations of the results.

Keywords: low-temperature bath, measurement uncertainty, temperature stability, radial, and axial gradient

1. Uvod

Ovaj završni rad ima za zadatak opisati eksperimentalno ispitivanje karakteristike kupke ispunjene etanolom, provedeno u temperaturnom rasponu od $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Svrha određivanja karakteristike kupke je kako bi se, prilikom njezinog naknadnog korištenja za umjeravanje termometara, mogla odrediti ukupna mjerna nesigurnost tih umjeravanja. Nesigurnost umjeravanja termometara je bitna zato što pokazuje koliko umjereni termometri mogu potencijalno griješiti i nakon korekcije odstupanja utvrđenih umjeravanjem. Ova etanolom ispunjena kupka se koristi u Laboratoriju za procesna mjerenja (LPM) na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu (FSB). Ispitivanje karakteristika ovakvih kupki daje nam uvid u njihova svojstva, na temelju kojih možemo procijeniti da li je kupka prikladna za pojedine namjene.

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

Problem zbog kojeg se i krenulo u ovakvo umjeravanje kupki je taj što proizvođači kupki daju djelomično nepotpune podatke, koji su često precijenjeni, 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, a koja bi obuhvatila sve tipove, izvedbe i karakteristike kupki, a uz to osigurala i pouzdane rezultate, u ovom radu koristit će se metoda ispitivanja koja je razvijena u Laboratoriju za procesna mjerenja.

2. Općenito o ispitivanju karakteristika termostatiranih kupki

Razlog ispitivanja termostatiranih kupki je potreba za poznavanjem njihovih karakteristika. Iako kupke imaju mnogo karakteristika (npr. raspon radnih temperatura, rezolucija temperaturnog regulatora i slično), u ovom radu opisano je eksperimentalno ispitivanje karakteristika koje su bitne prilikom njenog korištenja u mjeriteljstvu (radijalni i aksijalni temperaturni gradijenti i vremenska stabilnost temperature u radnom volumenu kupke). Poznavanjem ovih karakteristika, korisnik kupke može u izračun mjerne nesigurnosti umjeravanja termometara uključiti i doprinose vezane uz nesavršenosti kupke, kada se ona koristi u tu svrhu.

Karakteristike kupki navedene u tehničkoj dokumentaciji proizvođača, katalogu i stručnoj literaturi nerijetko su nedovoljno precizne i nepouzdanost ih se ne preporučuje koristiti prilikom izračuna mjernih nesigurnosti umjeravanja preciznih termometara. Osim nepouzdanosti podataka, svojstva kupke tijekom njezine eksploatacije se mogu promijeniti, što može uzrokovati pogreške u procjeni mjerne nesigurnosti pa je ispitivanja kupki potrebno redovito provoditi u određenim vremenskim razmacima. Što je rizik od pogrešne procjene mjerne nesigurnosti veći, a time i pogrešaka u mjerenju temperature termometrom umjerenim korištenjem pojedine kupke, to je češće potrebno provoditi ispitivanje karakteristika te kupke.

Budući da se mjerna nesigurnost u pravilu želi minimizirati, svaki laboratorij trebao bi redovito provoditi ispitivanja karakteristika kupki koje koristi za umjeravanje termometara. Kako ne postoji opće prihvaćena metoda ispitivanja, mjeritelji sami na temelju vlastitog iskustva i vrste kupke odabiru prikladnu metodu. U ovom radu korištena je metoda razvijena u Laboratoriju za procesna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, koja će biti detaljnije razrađena u daljnjem tekstu.

Osnovna svojstva koja se ispituju su: temperaturna homogenost i vremenska stabilnost temperature u radnom volumenu kupke. One ovise o konstrukciji same kupke, njenoj veličini, radnom mediju i načinu njegove cirkulacije te karakteristikama komponenata za regulaciju temperature. Temperaturne gradijente termostatiranih kupki možemo podijeliti na horizontalne i vertikalne odnosno na radijalne i aksijalne, ukoliko se određuju u termostatiranim kupkama cilindričnog oblika.

Bitno je napomenuti kako ne postoji idealno temperaturno homogena kupka te da je za određivanje horizontalnih i vertikalnih, odnosno aksijalnih i radijalnih temperaturnih gradijenata presudno iskustvo mjeritelja u radu s određenom kupkom, kao i opremom potrebnom za ispitivanje njenih karakteristika.

2.1. Niskotemperaturna kupka

Niskotemperaturna kupka je uređaj u čijem se radnom volumenu može ostvariti željena temperatura radnog medija. Prilikom promatranja određene kupke možemo istaknuti dvije ključne mjeriteljske karakteristike, a to su vremenska stabilnost i temperaturna homogenost, a koje spadaju u doprinose nesigurnosti tipa B. Ovaj tip nesigurnosti se temelji na načinu prikupljanja informacija, a koji ne proizlazi iz statističke analize. Procjene ovog tipa mogu se dobiti iz prethodnih ispitivanja i iskustva, stručne literature ili tehničke dokumentacije proizvođača. Vrlo je čest slučaj da kod nesigurnosti tipa B poznajemo maksimalne i minimalne vrijednosti između kojih se nalazi tražena vrijednost. Ukoliko je vjerojatnost da bilo koja nasumce odabrana vrijednost nepoznatog parametra, unutar promatranog intervala, bude upravo ona stvarna, govorimo o doprinosu mjernoj nesigurnosti s pravokutnom razdiobom.

Niskotemperaturnim kupkama se smatraju one kupke kojima se mogu ostvarivati temperature u rasponu od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kao i kod svih drugih zona kontrolirane temperature, ključni su podaci o temperaturnoj homogenosti i vremenskoj stabilnosti te se iz tog razloga eksperimentalno određivanje ovih parametara provodi u laboratoriju. Općenito, postupak određivanja navedenih parametara za zone kontrolirane temperature s različitim radnim medijima (voda, etanol, ulje, aluminij oksid) omogućuje njihovo sustavno praćenje u svrhu pravilne procjene njihovog doprinosa ukupnoj mjernoj nesigurnosti termometara koji se u njima umjeravaju.

U ovom završnom radu eksperimentalno je ispitana niskotemperaturna kupka punjena etanolom, u temperaturnom rasponu od $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.2. Temperaturni gradijenti

Temperaturni gradijent predstavlja promjenu temperature u smjernu normale na izotermnu plohu, što znači da temperaturni gradijent predstavlja vektor okomit na izotermnu plohu s pozitivnim predznakom u smjeru povećanja temperature. Matematički gledano, temperaturni gradijent je derivacija temperature ϑ po normali n :

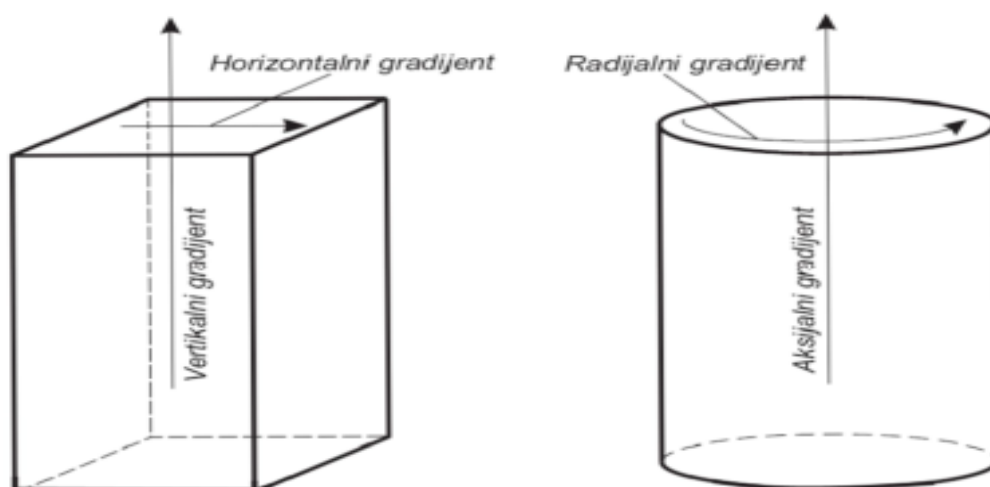
$$\text{grad } \vartheta = \vec{n}_0 * \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\Delta \vartheta}{\Delta n} = \vec{n}_0 * \frac{\delta \vartheta}{\delta n} \quad (1)$$

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

Osnovni gradijenti koji se mogu odrediti su horizontalni i vertikalni, a ako govorimo o cilindričnoj kupki to su aksijalni i radijalni gradijenti. Radijalni gradijenti određuju se mjerenjem temperaturnih razlika između dvije ili više pozicija unutar radnog volumena kupke, pri čemu su termometri postavljeni na istoj visini u odnosu na dno radnog volumena. Aksijalni gradijenti mjere se na različitim visinama u odnosu na dno kupke, pomicanjem termometra u vertikalnom smjeru. Za pravilno određivanje temperaturnih gradijenata potrebna su minimalno dva termometra, od kojih se jedan proglašava referentnim dok se drugome mijenja položaj unutar radnog volumena kupke. Shematski prikaz temperaturnih gradijenata dan je na slici 1.



Slika 1. Prikaz temperaturnih gradijenata

3. Zona umjeravanja

Zona umjeravanja je imaginarni prostor unutar radnog volumena kupke u kojemu se nalaze etalonski i umjeravani termometri. Kao zonu umjeravanja možemo koristiti izotermalni blok s provrtima, prikazan na slici 2. U tom slučaju zonu umjeravanja čine provrti za umetanje termometara u bloku. Drugi način je bez izotermalnog bloka, gdje je gradijente potrebno odrediti u onom dijelu radnog volumena koji će se kasnije koristiti za umjeravanje termometara.

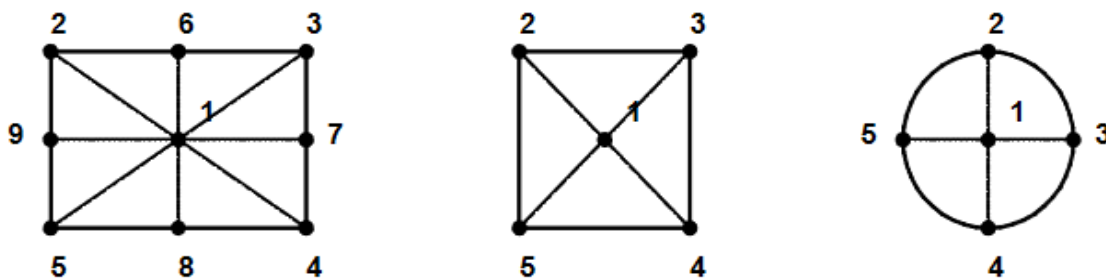
3.1. Izotermalni blok

Izotermalni blok je obično cilindričnog oblika, izrađen je od bakra u kojem su izbušeni provrti za umetanje termometara. Zbog relativno velike toplinske tromosti, u provrtima ovakvih blokova postiže se veća stabilnost temperature u odnosu na stabilnost radnog medija u koji je blok uronjen. Jedan takav blok prikazan je na slici 2.



Slika 2. Primjer izotermalnog bloka termostatiranih kupki

Razlike temperatura između različitih položaja termometra u odnosu na referentni termometar predstavljaju temperaturne gradijente, a praktično se dobiju premještanjem jednog termometra u odnosu na referentni na različite pozicije unutar bloka u radijalnom i aksijalnom smjeru. Ovakom možemo odrediti razliku temperatura promatranih provrta izotermalnog bloka ali će pritom točnost određivanja gradijenata ovisiti o međusobnim odstupanjima termometara. Točnost određivanja gradijenata može se povećati eliminiranjem međusobnih odstupanja termometara. Međusobna odstupanja termometara mogu se odrediti i poništiti postavljanjem svih osjetnika temperature u neposrednu blizinu u kupki, bilježenjem razlika u njihovim očitajima i svođenjem tih razlika na nulu. Nakon toga može se nastaviti s eksperimentalnim određivanjem temperaturnih gradijenata, pri čemu je važno napomenuti da je međusobna odstupanja termometara potrebno odrediti i korigirati u svakoj temperaturnoj točki u kojoj se provodi ispitivanje gradijenata. Poništavanje međusobnih odstupanja očitavanja termometara na nekoj temperaturi može se ostvariti zamjenom njihovih pozicija. Pritom se prvo mjerenje provodi s termometrom T1 postavljenim u provrt P1 i termometrom T2 u postavljenim u provrt P2, nakon čega se njihove pozicije zamijene tako da se termometar T1 postavi u provrt P2 a termometar T2 u provrt P1. Prilikom provedbe određivanja karakteristika kupke razmatrane u ovom radu, međusobna odstupanja dvaju korištenih termometara poništena su zamjenom njihovih pozicija na svakoj ispitnoj temperaturi. Kako nema unaprijed određenih mjesta za poziciju termometara, same se odabiru prema iskustvu i obliku zone. Mogući položaji su prikazani na slici 3.



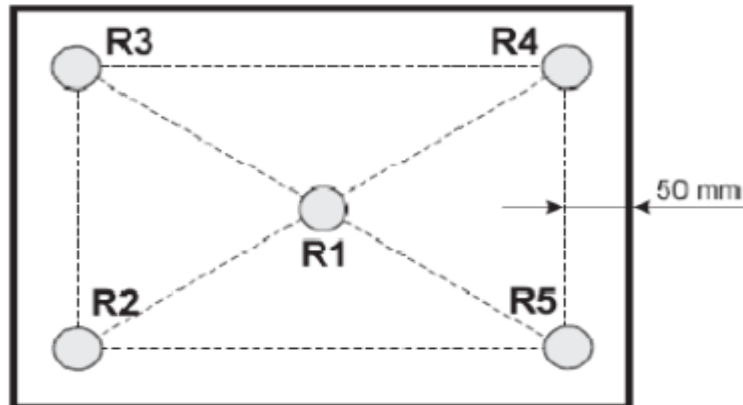
Slika 3. Mogući položaji termometara tijekom ispitivanja temperaturnih gradijenata u radnom volumenu zone kontrolirane temperature

Neki od podataka koji moraju biti navedeni uz rezultate ispitivanja karakteristika kupke s izotermalnim blokom su:

- pozicija izotermalnog bloka unutar radnog volumena zone kontrolirane temperature
- geometrija izotermalnog bloka
- provrti koji jesu (ili nisu) obuhvaćeni ispitivanjem
- dimenzije radnog volumena zone kontrolirane temperature

3.2. Kupka bez izotermalnog bloka

Kada imamo situaciju u kojoj se umjeravanje termometara provodi bez izotermalnog bloka, vrlo je bitno da, uz rezultate ispitivanja karakteristika kupke, točno opišemo geometriju zone umjeravanja kao i lokacije mjernih pozicija na koje su postavljeni osjetnici temperature. Primjer specifikacije mjernih pozicija u ovom slučaju dan je slikom 4.



Slika 4. Primjer opisivanja geometrije ispitivane zone i mjernih pozicija termometara tijekom ispitivanja

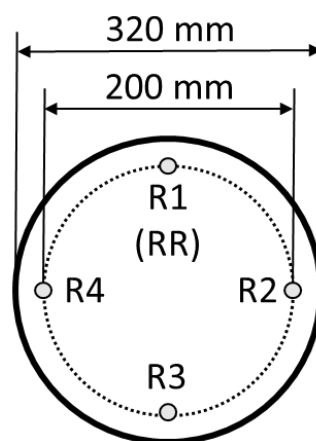
Postupak određivanja gradijenata u radnom volumenu kupke bez izotermalnog bloka provodi se gotovo identično kao kod njegovog korištenja. Jedina razlika je u tome da se promjena položaja osjetnika temperature, umjesto u provrtima bloka, provodi na unaprijed definiranim pozicijama unutar promatranog dijela radnog volumena kupke.

4. Karakteristike zona kontrolirane temperature

Kao što je spomenuto u prethodnim poglavljima, ne postoji standardna metoda za eksperimentalno određivanje karakteristika kupki, odnosno izotermalnih zona koje se promatraju unutar njihovih radnih volumena, pa se svaki laboratorij koristi različitim metodama, ovisno o izotermalnoj zoni i parametrima koji se žele odrediti. Praktični dio ovog rada proveden je u skladu s internom procedurom Laboratorija za procesna mjerenja s naslovom "TESTING OF ISOTHERMAL ZONES". Budući da je radni volumen kupke ispitivane u okviru ovog rada bio cilindričnog oblika, određivali su se njeni radijalni i aksijalni temperaturni gradijenti.

4.1. Određivanje radijalnih temperaturnih gradijenata

Za eksperimentalno određivanje razlika u očitavanju radijalnih gradijenata kupke u ovom su radu korištena dva slična osjetnika temperature (isti proizvođač i isti model), od kojih je jedan bio postavljen na referentnu poziciju (RR), dok je drugi pomican na različite pozicije RX, koje su prikazane na slici 5. Punom linijom označen je promjer cilindričnog radnog volumena kupke dok je crtkanom linijom označen dio volumena na koji se odnosi karakterizacija.



Slika 5. Primjer opisivanja geometrije ispitivane zone i mjernih pozicija termometara tijekom ispitivanja

Prije samog određivanja radijalnih gradijenata unutar promatranog dijela radnog volumena kupke potrebno je odrediti kolika su međusobna odstupanja očitavanja termometara, kada se njihovi osjetnici nalaze na istoj temperaturi. U tu svrhu korištena je metoda zamjene pozicija termometara, opisana u literaturi [1]. Uz međusobno odstupanje očitavanja, zamjenom osjetnika

između dvije promatrane pozicije moguće je ujedno odrediti i radijalni gradijent između tih pozicija. Tijekom određivanja radijalnih gradijenata kupke LPM-a, zamjena pozicija osjetnika temperature s oznakama TEPOT20 i TEPOT21 provedena je na svakoj ispitnoj temperaturi. Mjerenje je započelo s termometrom TEPOT20 postavljenim na poziciju R1 i termometrom TEPOT21 postavljenim na poziciju R2. Nakon mjerenja u tim pozicijama, pozicije osjetnika su zamijenjene, pri čemu je TEPOT20 premješten na poziciju R2 dok je TEPOT21 premješten na poziciju R1. Očitavanja termometra TEPOT20 na poziciji R1 možemo opisati kao temperaturu radnog medija na poziciji R1 (ϑ_1), uvećanu za pogrešku tog termometra (E_1). Na isti način očitavanja termometra TEPOT21 na poziciji R2 možemo opisati kao temperaturu radnog medija na poziciji R2 (ϑ_2), uvećanu za pogrešku termometra (E_2). Dakle:

$$\text{očitavanje}_{TEPOT20} = \vartheta_1 + E_1 \quad (2)$$

$$\text{očitavanje}_{TEPOT21} = \vartheta_2 + E_2 \quad (3)$$

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

$$\text{očitavanje}_{TEPOT20} = \vartheta_2 + E_1 \quad (4)$$

$$\text{očitavanje}_{TEPOT21} = \vartheta_1 + E_2 \quad (5)$$

Kombiniranjem gornjih izraza, pod opravdanim pretpostavkama da se temperature radnog medija na pozicijama R1 i R2 tijekom zamjene nisu mijenjale kao što se nisu mijenjale niti pogreške termometara, moguće je izvesti izraz za izračunavanje razlike temperatura radnog medija na pozicijama R1 i R1 (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:

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

Sve daljnje promjene radijalnih i aksijalnih pozicija osjetnika TEPOT20 provodile su se bez zamjene, odnosno, položaj osjetnika TEPOT21 se nakon prve zamjene više nije mijenjao. Pritom se preostali radijalni gradijenti izračunavaju 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:

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

, gdje je n 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:

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

4.2. Određivanje aksijalnih temperaturnih gradijenata

Kao i za određivanje radijalnih temperaturnih gradijenata, za aksijalne gradijente se također koriste najmanje dva termometra. Pritom se jedan osjetnik postavlja na referentnu poziciju R1 (RR), a drugi na jednu od pozicija RX. Mjerenje započinje s oba osjetnika postavljena na dno ispitivanog dijela radnog volumena kupke, nakon čega se osjetnik na poziciji RX u jednakim koracima podiže prema vrhu ispitivanog dijela radnog volumena. Pomicanom termometru se pritom ne mijenja radijalni već samo aksijalni položaj. Visina zone unutar radnog volumena kupke karakterizirane u ovom radu iznosila je 250 mm. Karakterizacija je provedena pomicanjem osjetnika temperature u koracima od 50 mm.

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 RX-hY i RR (oznaka h se odnosi na vertikalni položaj osjetnika temperature)

ϑ_{hY} - temperatura na poziciji RX-hY

ϑ_{RR} - temperatura na referentnoj poziciji RR

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:

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

, gdje je n broj promatranih aksijalnih pozicija

Za potrebe utvrđivanja doprinosa aksijalnih gradijenata ukupnoj nesigurnosti umjeravanja termometara, ova se vrijednost prihvaća kao širina poluintervalu 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:

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

Potrebno je napomenuti da se, i kod određivanja radijalnih i kod određivanja aksijalnih gradijenata, nakon svake promjene položaja osjetnika temperature čekalo da se njegova očitavanja na novom položaju stabiliziraju, nakon čega je zabilježeno je 15 očitavanja temperature u trajanju od 9.5 minuta. Temperatura na određenoj poziciji izračunata je kao srednja vrijednost očitavanja ovih 15 očitavanja. Kao parametar za utvrđivanje stabilnih očitavanja termometara korišten je nagib pravca koji aproksimira očitavanja termometara u periodu od zadnjih 15 minuta. Nagib pravca određen je linearnom regresijom metodom najmanjih kvadrata. Uvjet zadovoljavajuće stabilnosti predstavljao je nagib pravca manji ili jednak 1 mK.

4.3. Temperaturna stabilnost

Temperaturna stabilnost se određuje na način da se u bilo koji od provrta RX (uključujući i RR) 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 intervala 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:

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

4.4. Ukupni doprinos mjernoj nesigurnosti

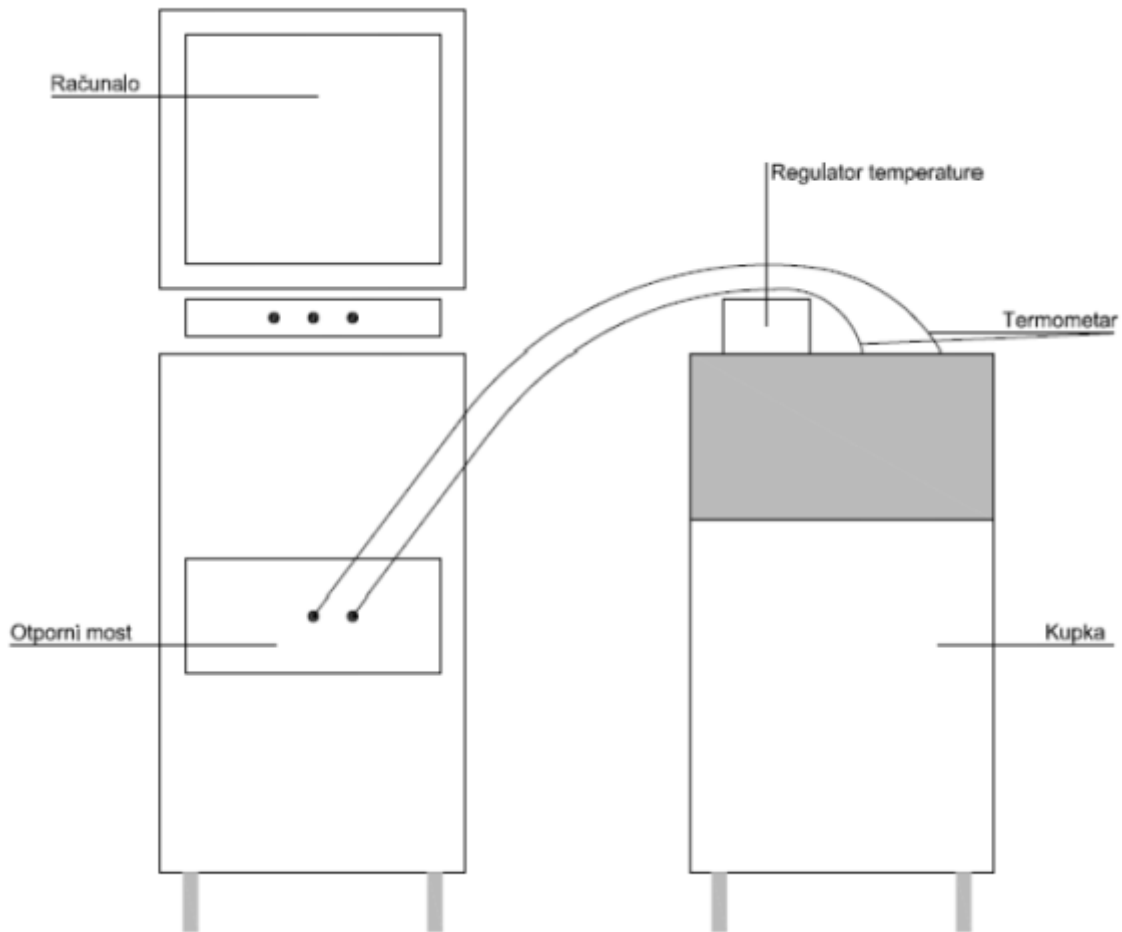
Nakon što se uz pomoć eksperimenata i matematičkih izračuna odrede radijalni i aksijalni temperaturni gradijenti kao i temperaturna stabilnost unutar promatranog dijela radnog volumena kupke, ukupan standardni doprinos nesigurnosti zbog neidealnih karakteristika kupke može se izračunati pomoću jednadžbe:

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

5. Korištena oprema

Oprema koja je korištena za ispitivanje kupke, uključujući i samu kupku, sastavni je dio opreme Laboratorija za procesna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

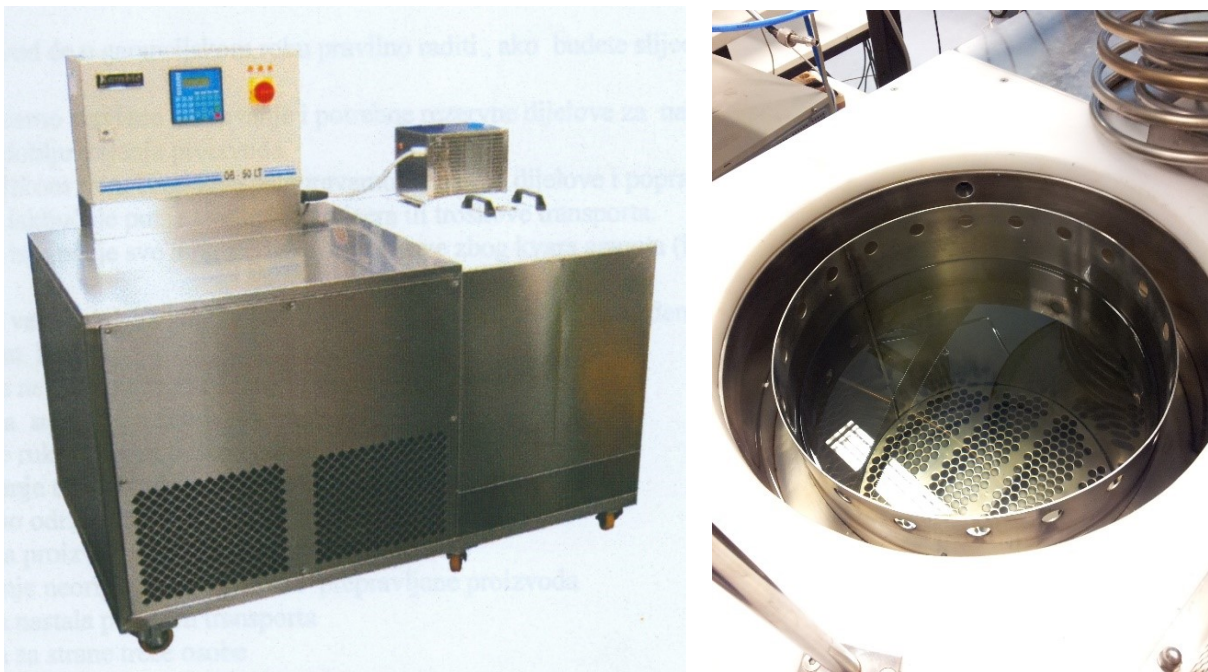
Općeniti prikaz mjerne linije dan je na slici 6.



Slika 6. Opći prikaz mjerne linije

5.1. Termometrijska kupka

Ispitivana je kupka proizvođača "Kambič Laboratorijska oprema". Kupka se u LPM-u koristi u temperaturnom rasponu od -70 °C do 10 °C , pri čemu se kao radni medij upotrebljava etanol. Kupka je izvedena kao dvije paralelne cijevi od kojih su u jednoj smješteni grijač, izmjenjivač topline hladila i osjetnik regulatora temperature, dok druga cijev predstavlja radni volumen kupke. Unutar prve cijevi, nalazi se još i miješalica koja osigurava turbulentno strujanje, a na ulazu u drugu cijev postavljena je mreža kojom se ostvaruje laminarno strujanje radnog fluida. Fotografija kupke dana je na slici 7, dok su tehničke specifikacije navedene u tablici 1.



Slika 7. Kupka Kambič OB - 50 LT

Tablica 1. Osnovne karakteristike termometrijske kupke

Proizvođač	Kambič Laboratorijska oprema
Model	OB – 50 LT
Temperaturno područje	-70 °C do 60 °C
Radni volumen	cca. 60 L (Ø 320 x 430 mm)
Temperaturna stabilnost	< ±0.02 °C
Brzina hlađenja	cca. 11 °C·h ⁻¹
Brzina zagrijavanja	cca. 25 °C·h ⁻¹

5.2. Osjetnici temperature

Tijekom ispitivanja korišteni su etalonski otpornički osjetnici temperature internih oznaka TEPOT20 i TEPOT21. Ove termometre moguće je koristiti za precizna mjerenja temperature u temperaturnom rasponu od -200 °C do 661 °C. Oblikovani su na način da se ili umetnu direktno u radni fluid ili u provrt u krutom tijelu. Osjetni element je proizveden korištenjem platinske žice vrlo visoke čistoće. S termometrijskim otporničkim mostom se povezuju sa četiri žice, čime se postižu najpreciznija mjerenja. Fotografija platinskog otporničkog termometra dana je na slici 8., dok su tehnički podaci navedeni u tablici 2.



Slika 8. Platinski otpornički termometar

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

5.3. Instrumenti za mjerenje električnog otpora osjetnika temperature

Za mjerenje otpora, a time i temperature platinskih otporničkih osjetnika, korišteni su sljedeći instrumenti:

- 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)

ASL F700 je termometrijski otpornički most korišten za mjerenje otpora platinskih otporničkih termometara. U kombinaciji s etalonskim otpornikom nazivnog električnog otpora 100 Ω , ovim je mostom moguće mjeriti električne otpore u rasponu od 0 Ω do 400 Ω s rezolucijom od 1 ppm. Most ima jedan ulazni kanal za spajanje termometara. Na slici 9. prikazana je fotografija korištenog termometrijskog otporničkog mosta, dok su u tablici 3 dani njegovi osnovni tehnički podaci.



Slika 9. Termometrijski otpornički most

Tablica 3. Tehničk 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 mjerenja	10 sekundi za potpuni balans	
Linearnost	< ±1 zadnja decimala (1 ppm)	
Točnost	0.25 mK puni raspon/ 6 mK do 1064 °C ovisno o otporu	

Budući da su za provedbu karakterizacije kupke potrebna dva osjetnika temperature, termometrijski otpornički most ASL F700 povezan je s multipleksorom i njegovom upravljačkom jedinicom. Upotrebom multipleksora omogućeno je povezivanje obaju termometara na isti otpornički most. Korišteni multipleksor prikazan je na slici 10, a njegove su specifikacije navedene u tablici 4.



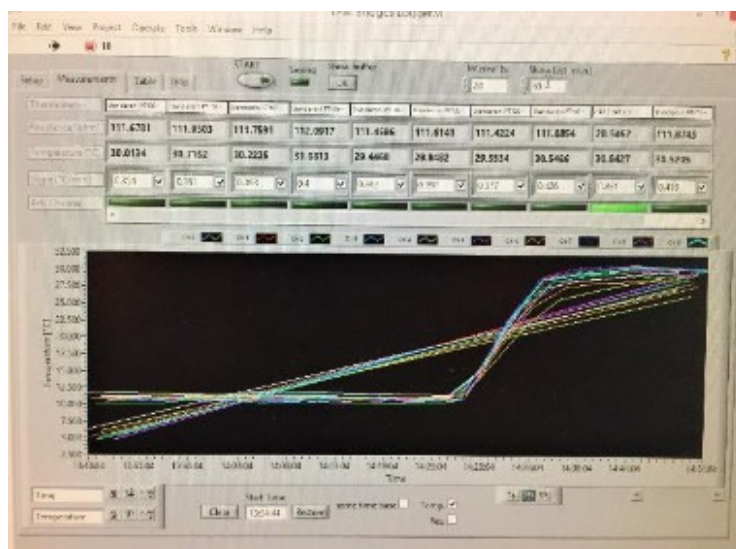
Slika 10. Multipleksor

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	

5.4. Računalo i akvizicijski programi

Računalo se koristi prvenstveno za prikupljanje i pohranu očitavanja s termometrijskog otporničkog mosta kao i za upravljanje radom multipleksora. Uz navedeno, računalni program izrađen u Laboratoriju za procesna mjerenja omogućuje tablični i grafički prikaz mjerenih vrijednosti, statističku obradu podataka, podešavanje postavki mosta i preračunavanje izmjerenih električnih otpora osjetnika u pripadne temperature. Prikaz sučelja računalnog programa za prikupljanje podataka dan je na slici 11.



Slika 11. Prikaz sučelja LPM-ovog programa za očitavanje i pohranjivanje podataka izmjerenih termometrijskim otporničkim mostom

6. Postupak ispitivanja

Općeniti redoslijed ispitivanja karakteristika kupke:

- a) Nakon paljenja kupke, na digitalnom temperaturnom regulatoru podešava se željena ispitna temperatura, nakon čega je potrebno pričekati da kupka postigne zadanu temperaturu.
- b) Nakon postizanja željene stacionarne ispitne temperature, određuje se temperaturna homogenost (prostorni gradijenti temperature) i stabilnost, u skladu s postupcima opisanim u poglavlju 4.
- c) Prijelaz na sljedeću ispitnu temperaturu ostvaruje se njenim unošenjem u digitalni regulator, nakon čega je potrebno pričekati postizanje stacionarnog stanja na novoj temperaturi.

6.1. Ispitne temperature

Za karakterizaciju kupke u određenom temperaturnom rasponu, ispitivanja je potrebno provesti u najmanje tri temperaturne točke:

- najnižoj temperaturi raspona
- srednjoj temperaturi raspona
- najvišoj temperaturi raspona

Moguće je, a i poželjno, ispitivanje provesti u više od tri temperaturne točke. Dodatne temperaturne točke, unutar željenog temperaturnog raspona, koriste se radi dobivanja boljeg uvida u karakteristike kupke.

6.2. Uvjeti okoliša

Kako bi provedeno ispitivanje bilo korektno, potrebno je paziti i na uvjete okoliša u kojem se ono provodi. Tijekom ispitivanja obuhvaćenih ovim radom, potrebni uvjeti okoliša u prostoriji laboratorija bili su:

- Temperatura zraka u prostoriji između 15 °C i 35 °C, s oscilacijama nižim od 3 °C
- Relativna vlažnost zraka između 25 %RH i 75 %RH.

Uvjeti okoliša tijekom mjerenja bilježeni su umjerenim higrotermometrom.

6.3. Priprema mjerenja

Prije početka mjerenja moraju biti osigurani osnovni uvjeti kako bi se mjerenje moglo pravilno provesti. Laborant u svrhu pripreme za provedbu mjerenja mora u okoliš termostatisirane kupke postaviti uređaje za praćenje uvjeta okoliša, te pričekati stabilizaciju i stacionarno stanje tih uvjeta. Potrebno je pregledati kupku koja se ispituje te ako se tijekom tog pregleda ustanovi da nije moguće izvesti mjerenja, ispitivanje se zaustavlja. U slučaju da je ugrožena sigurnost mjeritelja ispitivanje se zaustavlja. Nakon provedenih navedenih mjera opreza, određuju se temperaturne točke ispitivanja, a uz njih se određuje i prostorni razmještaj točaka unutar kupke u kojoj se izvršava mjerenje. Laborant na kraju priprema termometre i ostalu opremu koja je potrebna za provedbu ispitivanja.

7. Rezultati ispitivanja

Ispitivanje karakteristika kupke je provedeno na ispitnim temperaturama $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. U ovom poglavlju dan je grafički i tablični pregled rezultata ispitivanja.

7.1. Radijalni temperaturni gradijenti

7.1.1. Radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tablica 5. Eksperimentalno određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$

Očitavanja T1, $^{\circ}\text{C}$	Očitavanja T2, $^{\circ}\text{C}$			Radijalni gradijenti, $^{\circ}\text{C}$
R1 (RR)	R2	R3	R4	
-70,0304	-70,0273			-0,0018
-70,0301		-70,0228		-0,0060
-70,0288			-70,0211	-0,0064

Tablica 6. Matematički određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$

	Radijalni gradijenti, $^{\circ}\text{C}$
R2 - R3	0,0042
R2 - R4	0,0046
R3 - R4	0,0003

Tablica 7. Najveći radijalni gradijent na ispitnoj temperaturi $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$

Pozicije	Radijalni gradijent $\Delta\vartheta_R$ mK	Standardna nesigurnost u_{RG} mK
R1 – R4	6,4	3,7

7.1.2. Radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tablica 8. Eksperimentalno određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Očitavanja T1, $^{\circ}\text{C}$	Očitavanja T2, $^{\circ}\text{C}$			Radijalni gradijenti, $^{\circ}\text{C}$
R1 (RR)	R2	R3	R4	
-49,8359	-49,8250			-0,0109
-49,8337		-49,8264		-0,0072
-49,8281			-49,8180	-0,0100

Tablica 9. Matematički određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$

	Radijalni gradijenti, $^{\circ}\text{C}$
R2 - R3	-0,0037
R2 - R4	-0,0008
R3 - R4	0,0029

Tablica 10. Najveći radijalni gradijent na ispitnoj temperaturi $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Pozicije	Radijalni gradijent $\Delta\vartheta_R$ mK	Standardna nesigurnost u_{RG} mK
R1 – R2	10,9	6,3

7.1.3. Radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tablica 11. Eksperimentalno određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Očitavanja T1, $^{\circ}\text{C}$	Očitavanja T2, $^{\circ}\text{C}$			Radijalni gradijenti, $^{\circ}\text{C}$
R1 (RR)	R2	R3	R4	
-30,0253	-30,0220			-0,0007
-30,0305		-30,0355		0,0059
-30,0241			-30,0182	-0,0052

Tablica 12. Matematički određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

	Radijalni gradijenti, $^{\circ}\text{C}$
R2 - R3	-0,0066
R2 - R4	0,0045
R3 - R4	0,0111

Tablica 13. Najveći radijalni gradijent na ispitnoj temperaturi $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Pozicije	Radijalni gradijent $\Delta\vartheta_R$ mK	Standardna nesigurnost u_{RG} mK
R3 – R4	11,1	6,4

7.1.4. Radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tablica 14. Eksperimentalno određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Očitavanja $T_1, \text{ }^{\circ}\text{C}$	Očitavanja $T_2, \text{ }^{\circ}\text{C}$			Radijalni gradijenti, $\text{ }^{\circ}\text{C}$
R1 (RR)	R2	R3	R4	
-10,0313	-10,0300			0,0004
-10,0320		-10,0259		-0,0045
-10,0308			-10,0227	-0,0065

Tablica 15. Matematički određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

	Radijalni gradijenti, $\text{ }^{\circ}\text{C}$
R2 - R3	0,0049
R2 - R4	0,0069
R3 - R4	0,0020

Tablica 16. Najveći radijalni gradijent na ispitnoj temperaturi $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Pozicije	Radijalni gradijent $\Delta\vartheta_R$ mK	Standardna nesigurnost u_{RG} mK
R2 – R4	6,9	4,0

7.1.5. Radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od 10 °C

Tablica 17. Eksperimentalno određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 10 °C

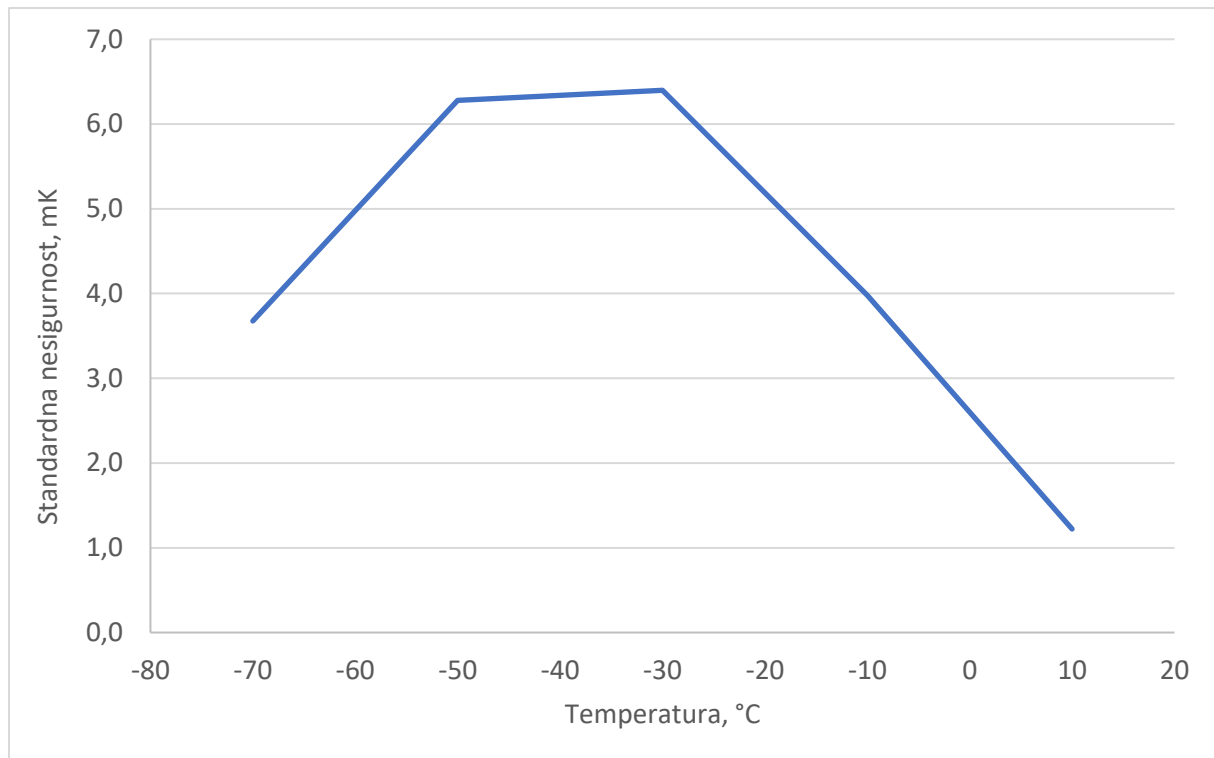
Očitavanja T1, °C	Očitavanja T2, °C			Radijalni gradijenti, °C
R1 (RR)	R2	R3	R4	
10,3070	10,3070			-0,0019
10,3046		10,3085		-0,0019
10,3065			10,3104	0,0002

Tablica 18. Matematički određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 10 °C

	Radijalni gradijenti, °C
R2 - R3	0,0000
R2 - R4	-0,0021
R3 - R4	-0,0021

Tablica 19. Najveći radijalni gradijent na ispitnoj temperaturi 10 °C

Pozicije	Radijalni gradijent $\Delta\vartheta_R$ mK	Standardna nesigurnost u_{RG} mK
R2 – R4 R3 – R4	2,1	1,2



Dijagram 1. Standardne mjerne nesigurnosti zbog radijalnih temperaturnih gradijenata

7.2. Aksijalni temperaturni gradijenti

7.2.1. Aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od -70 °C

Tablica 20. Eksperimentalno određeni aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi -70 °C

Termometar T2 – TEPOT21 – R1 (RR) Termometar T1 – TEPOT20 – R4							
Očitavanja T1, °C	Očitavanja T2, °C						Aksijalni gradijent, °C
h=0 mm	h=0 mm	h=50 mm	h=100 mm	h=150 mm	h=200 mm	h=250 mm	
-70,0288	-70,0211						
-70,0325		-70,0249					0,0000
-70,0272			-70,0182				0,0013
-70,0294				-70,0200			0,0017
-70,0282					-70,0202		0,0003
-70,0307						-70,0200	0,0030
Najveći doprinos u dijelu vertikalnog raspona od 0 do 250 mm				Aksijalni gradijent $\Delta\vartheta_A$, mK			3.0
				Standardna nesigurnost u_{AG} , mK			1.7

7.2.2. Aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od -50 °C

Tablica 21. Eksperimentalno određeni aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi -50 °C

Termometar T2 – TEPOT21 – R1 (RR) Termometar T1 – TEPOT20 – R4							
Očitavanja T1, °C	Očitavanja T2, °C						Aksijalni gradijent, °C
h=0 mm	h=0 mm	h=50 mm	h=100 mm	h=150 mm	h=200 mm	h=250 mm	
-49,8281	-49,8180						
-49,8326		-49,8211					0,0014
-49,8309			-49,8207				0,0001
-49,8310				-49,8224			-0,0015
-49,8319					-49,8219		-0,0001
-49,8313						-49,8213	-0,0001
Najveći doprinos u dijelu vertikalnog raspona od 50 do 150 mm				Aksijalni gradijent $\Delta\vartheta_A$, mK			2.9
				Standardna nesigurnost u_{AG}, mK			1.7

7.2.3. Aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od -30 °C

Tablica 22. Eksperimentalno određeni aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi -30 °C

Termometar T2 – TEPOT21 – R1 (RR) Termometar T1 – TEPOT20 – R4							
Očitavanja T1, °C	Očitavanja T2, °C						Aksijalni gradijent, °C
h=0 mm	h=0 mm	h=50 mm	h=100 mm	h=150 mm	h=200 mm	h=250 mm	
-30,0241	-30,0182						
-30,0241		-30,0184					-0,0002
-30,0237			-30,0190				-0,0012
-30,0233				-30,0176			-0,0002
-30,0233					-30,0167		0,0007
-30,0247						-30,0173	0,0015
Najveći doprinos u dijelu vertikalnog raspona od 100 do 250 mm				Aksijalni gradijent $\Delta\vartheta_A$, mK			2.7
				Standardna nesigurnost u_{AG}, mK			1.6

7.2.4. Aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od -10 °C

Tablica 23. Eksperimentalno dobiveni aksijalni gradijenti za temperaturu -10 °C

Termometar T2 – TEPOT21 – R1 (RR) Termometar T1 – TEPOT20 – R4							
Očitavanja T1, °C	Očitavanja T2, °C						Aksijalni gradijent, °C
h=0 mm	h=0 mm	h=50 mm	h=100 mm	h=150 mm	h=200 mm	h=250 mm	
-10,0308	-10,0227						
-10,0299		-10,0230					-0,0012
-10,0311			-10,0248				-0,0018
-10,0293				-10,0235			-0,0024
-10,0299					-10,0244		-0,0026
-10,0293						-10,0228	-0,0016
Najveći doprinos u dijelu vertikalnog raspona od 50 do 200 mm				Aksijalni gradijent $\Delta\vartheta_A$, mK			1.4
				Standardna nesigurnost u_{AG} , mK			0.8

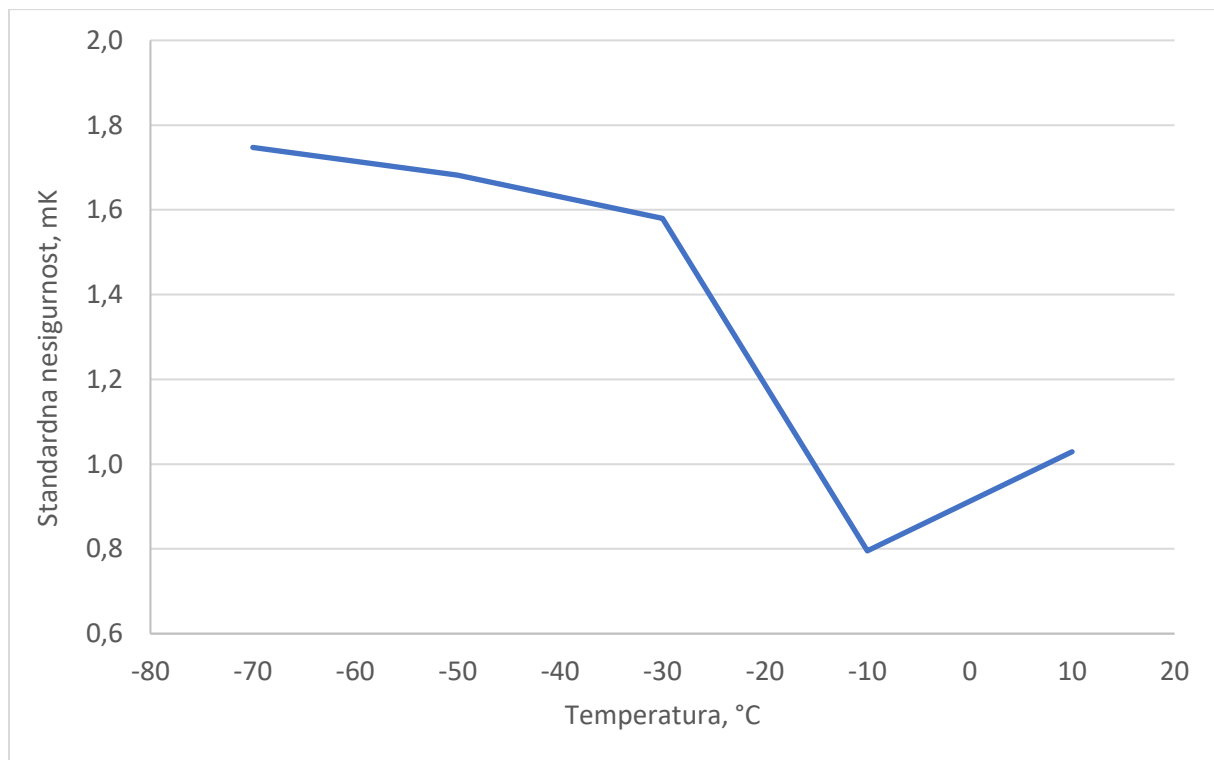
7.2.5. Aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi od 10 °C

Tablica 24. Eksperimentalno određeni aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 10 °C

Termometar T2 – TEPOT21 – R1 (RR) Termometar T1 – TEPOT20 – R4							
Očitavanja T1, °C	Očitavanja T2, °C						Aksijalni gradijent, °C
h=0 mm	h=0 mm	h=50 mm	h=100 mm	h=150 mm	h=200 mm	h=250 mm	
10,3043	10,3060						
10,3019		10,3036					0,0000
10,3033			10,3049				-0,0001
10,3028				10,3040			-0,0006
10,3024					10,3032		-0,0009
10,3028						10,3053	0,0009
Najveći doprinos u dijelu vertikalnog raspona od 200 do 250 mm				Aksijalni gradijent $\Delta\vartheta_A$, mK			1.8
				Standardna nesigurnost u_{AG} , mK			1.0

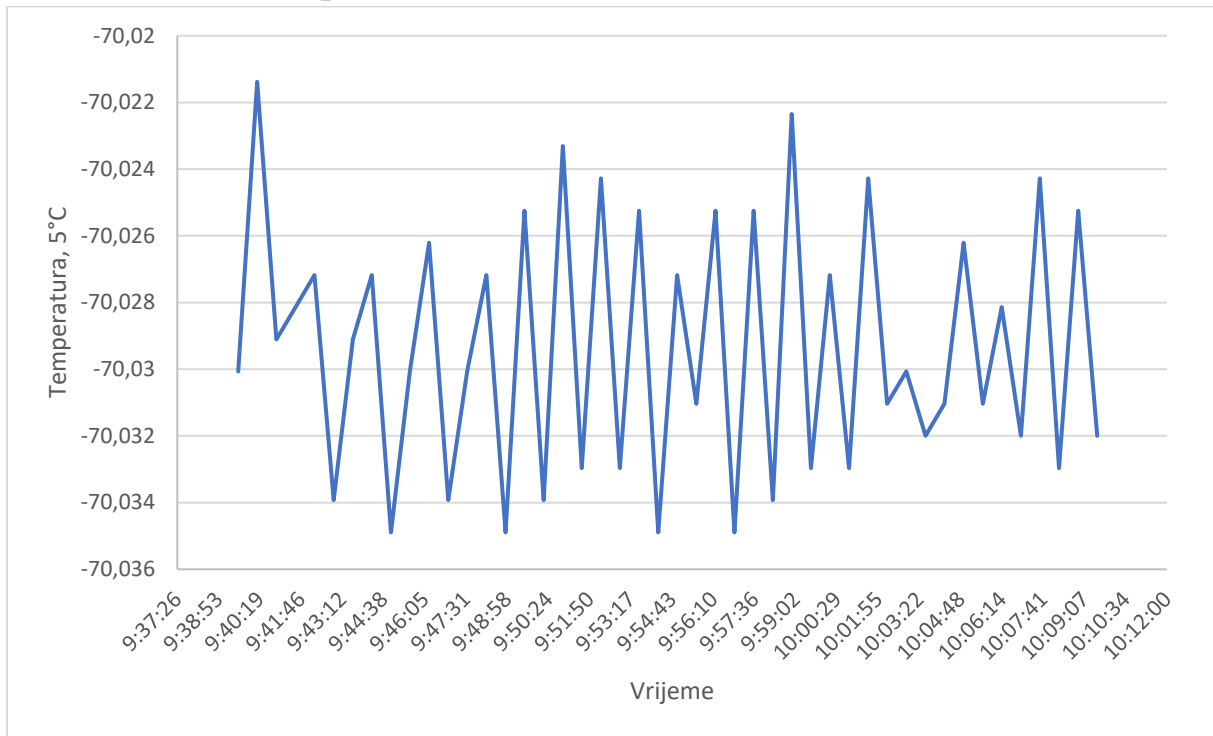
Tablica 25. Standardna mjerna nesigurnost zbog aksijalnih gradijenata

Ispitna temperatura, °C	Poluinterval pravokutne razdiobe a, mK	Standardna nesigurnost u, mK
-70	3,0	1,7
-50	2,9	1,7
-30	2,7	1,6
-10	1,4	0,8
10	1,8	1,0

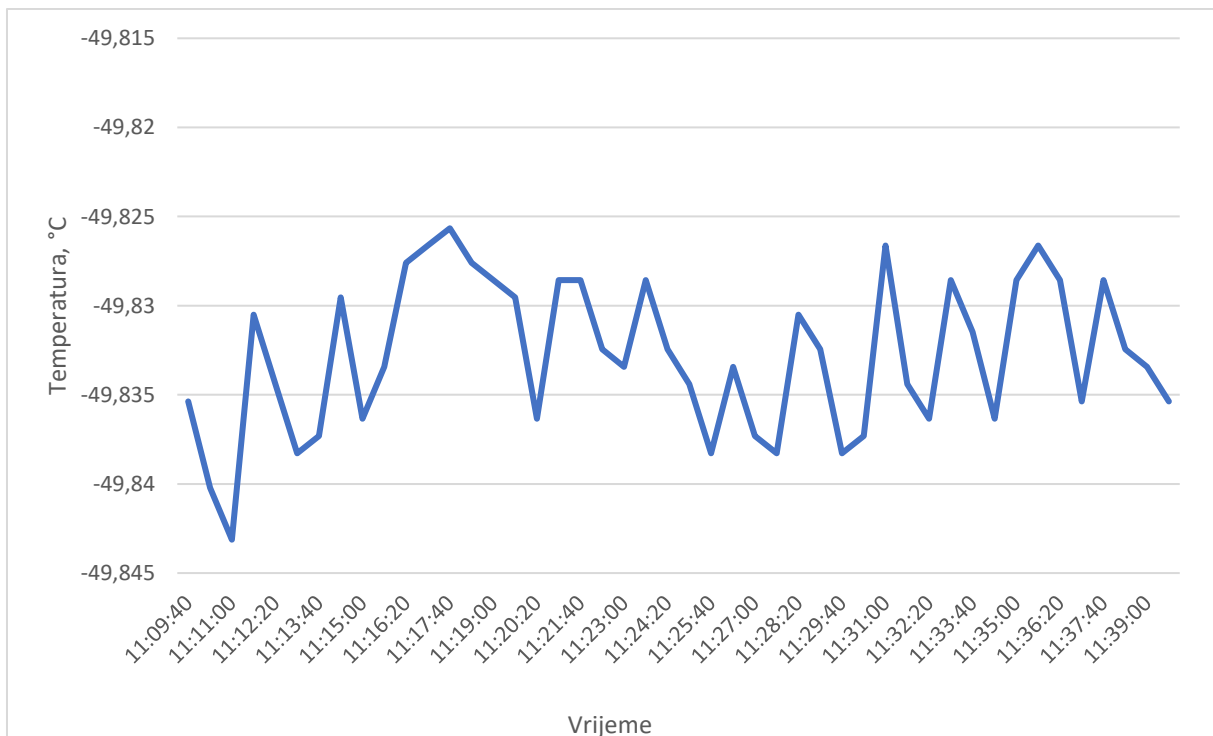


Dijagram 2. Standardne mjerne nesigurnosti zbog aksijalnih temperaturnih gradijenata

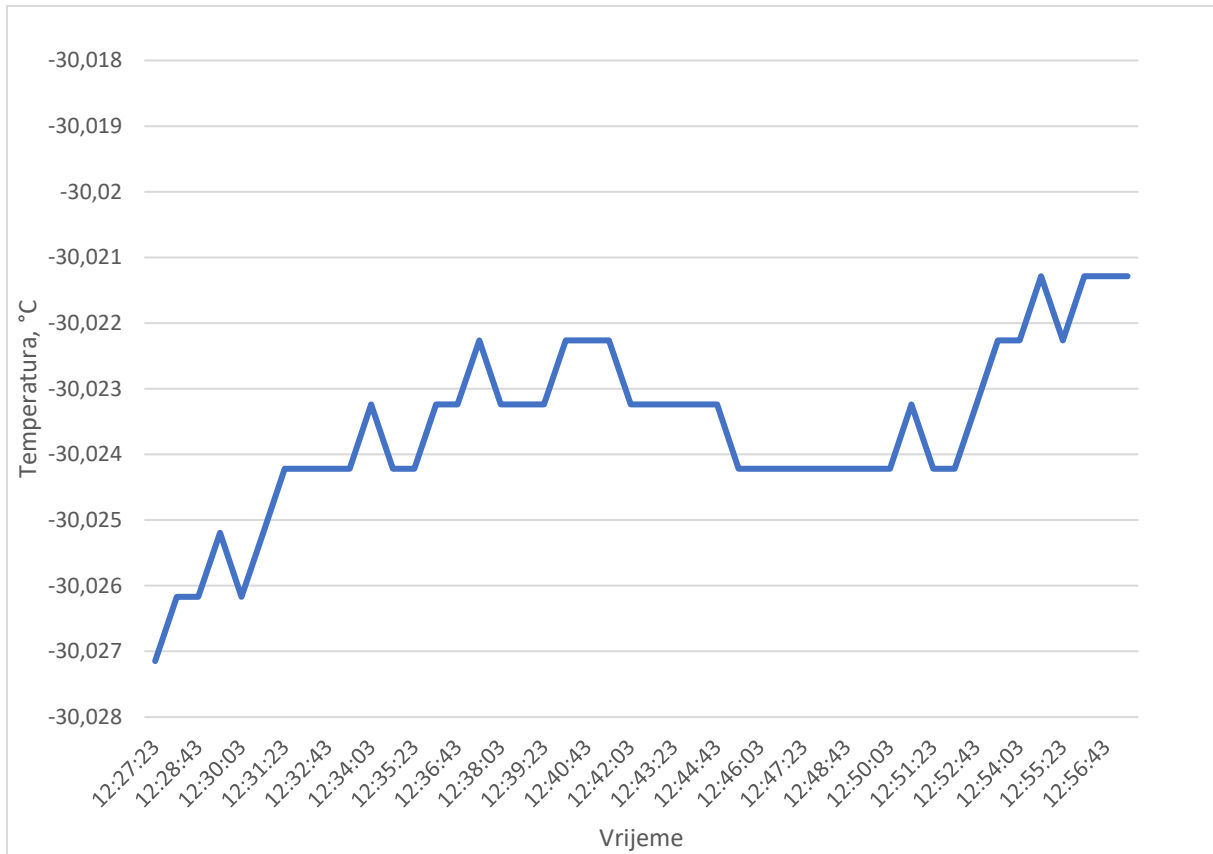
7.3. Stalnost temperature



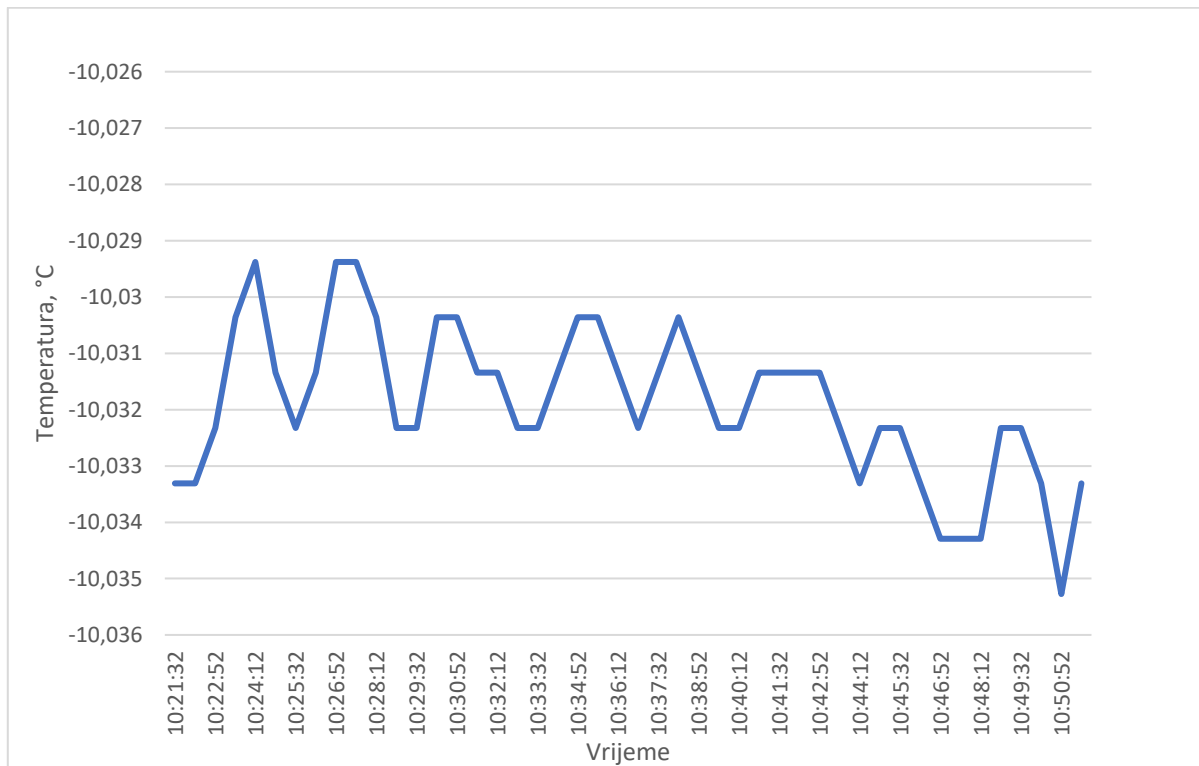
Dijagram 3. 30-minutna stabilnost temperature u ispitnoj točki -70 °C



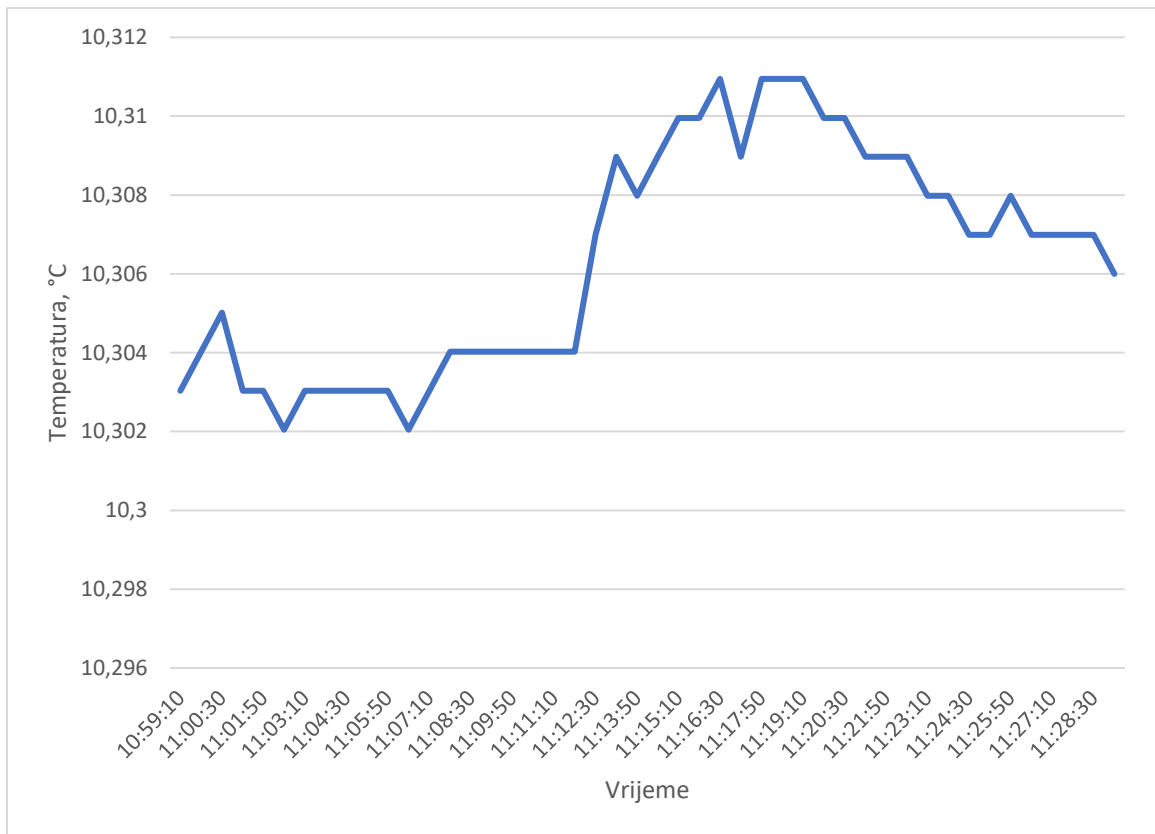
Dijagram 4. 30-minutna stabilnost temperature u ispitnoj točki -50 °C



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



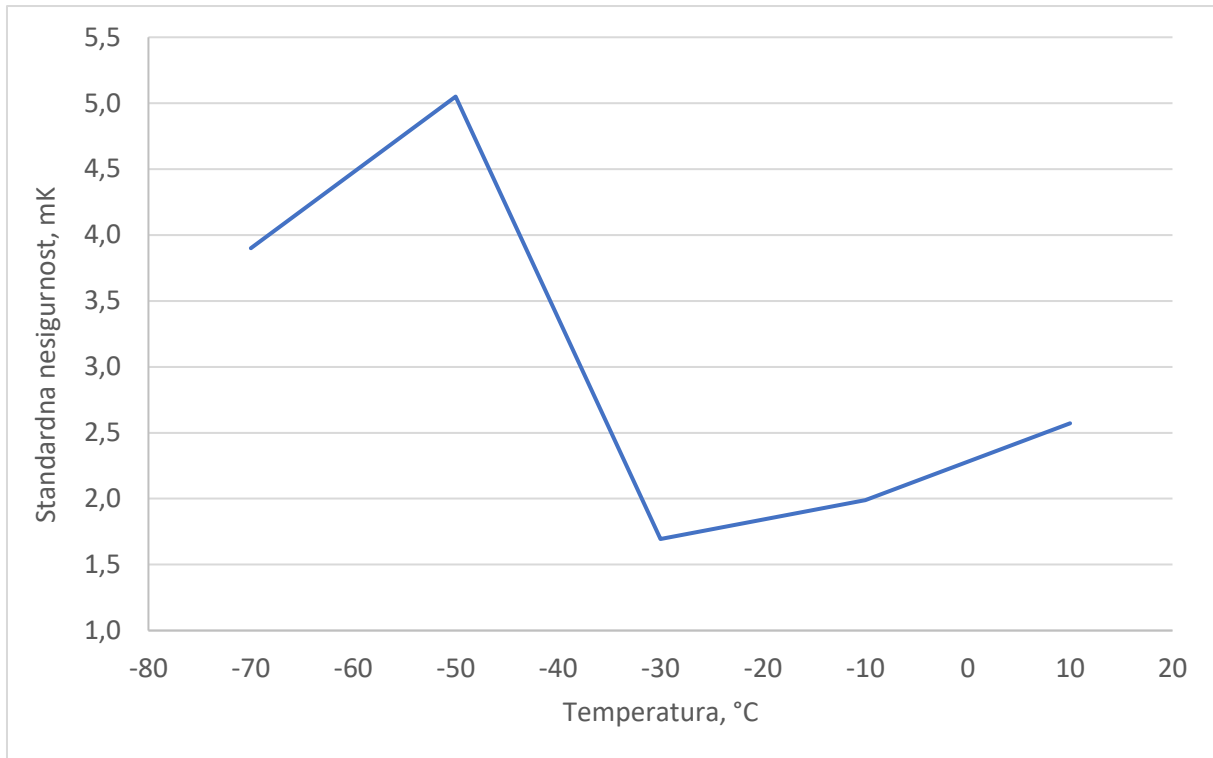
Dijagram 6. 30-minutna stabilnost temperature u ispitnoj točki -10 °C



Dijagram 7. 30-minutna stabilnost temperature u ispitnoj točki 10 °C

Tablica 26. Standardna mjerna nesigurnost zbog nestabilnosti temperature.

Ispitna temperatura, °C	Poluinterval pravokutne razdiobe a_s , mK	Standardna nesigurnost u_s , mK
-70	6,8	3,9
-50	8,7	5,0
-30	2,9	1,7
-10	3,4	2,0
10	4,5	2,6

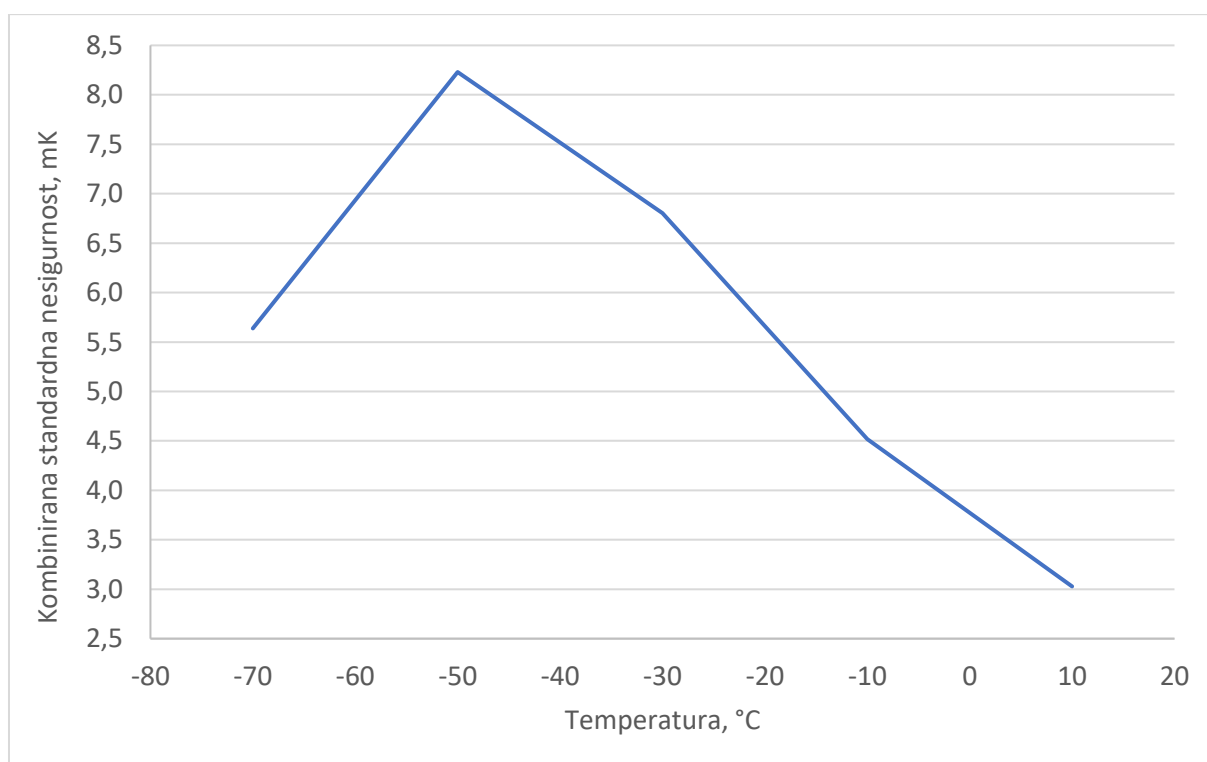


Dijagram 8. Standardne mjerne nesigurnosti zbog nestabilnosti temperature

7.4. Ukupna mjerna nesigurnost

Tablica 27. Ukupna (kombinirana) standardna mjerna nesigurnost zbog nesavršenosti kupke

Temperatura °C	-70	-50	-30	-10	10
Standardna nesigurnost zbog radijalnih gradijenata $u_{RG} (k=1)$, mK	3,7	6,3	6,4	4,0	1,2
Standardna nesigurnost zbog aksijalnih gradijenata $u_{AG} (k=1)$, mK	1,7	1,7	1,6	0,8	1,0
Standardna nesigurnost zbog nestabilnosti temperature $u_S (k=1)$, mK	3,9	5,0	1,7	2,0	2,6
Ukupna standardna nesigurnost zbog nesavršenosti kupke $u (k=1)$, mK	5,6	8,2	6,8	4,5	3,0



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

8. Zaključak

Ispitivanje karakteristika niskotemperaturne kupke provedeno je u Laboratoriju za procesna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, u skladu sa internom procedurom laboratorija. Kupka je ispitana u temperaturnom rasponu od $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, u temperaturnim točkama $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sa svrhom provedbe ispitivanja, sastavljena je adekvatna mjerna linija te su definirane ispitne pozicije unutar radnog volumena kupke. Eksperimentalna ispitivanja provedena su uz pomoć dva etalonska platinska otpornička osjetnika temperature, priključena na etalonski termometrijski otpornički most. Ispitivanjem niskotemperaturne kupke određeni su podaci o mjernim nesigurnostima temperatura ostvarenih u radnom volumenu kupke, koji su posljedica njenih nesavršenosti. Ovi podaci koristit će se za izračun ukupnih nesigurnosti umjeravanja za termometre koji će se umjeravati u predmetnoj kupki. Također, ova kupka je sastavni dio jedinog primarnog generatora injišta/rosišta zraka u Republici Hrvatskoj pa će se karakteristike određene ovim radom koristiti i prilikom izračuna mjernih nesigurnosti vezanih uz generiranje zraka poznatog injišta/rosišta. Ukupne nesigurnosti kupke, određene ovim radom, uključuju nesigurnosti zbog temperaturne nehomogenosti i temperaturne nestabilnosti unutar radnog volumena kupke.

Analizom dobivenih podataka može se vidjeti da dominantan utjecaj na ukupnu mjernu nesigurnost imaju radijalni gradijenti. Ukupna nesigurnost kupke nalazi se u rasponu od $3,0\text{ mK}$ (za ispitnu temperaturu $10\text{ }^{\circ}\text{C}$) do $8,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (za ispitnu temperaturu $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$). Zanimljivo je da najveća ukupna nesigurnost nije utvrđena na najnižoj ispitnoj temperaturi ($-70\text{ }^{\circ}\text{C}$), što bi se moglo očekivati. U svakom slučaju, na temelju uvida u rezultate ispitivanja može se zaključiti da su karakteristike kupke izuzetno dobre te je ona prihvatljiva za usporedbena umjeravanja preciznih termometara na niskim temperaturama kao i za primarne realizacije injišta/rosišta zraka.

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] Danijel Šestan: Nova metoda za realizaciju ljestvice injišta/rošišta zraka u temperaturnom području od -70 °C do 5 °C, doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2015.
- [6] Evaluation of baths and furnances, Laboratorij za procesna mjerenja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.