

Ispitivanje termostatirane kupelji

Suličić, Dora

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

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:235:597920>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-12**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Dora Suličić

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Davor Zvizdić, dipl. ing.

Dr. sc. Danijel Šestan, dipl. ing.

Studentica:

Dora Suličić

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se

Voditelju rada prof. dr.sc. Davoru Zvizdiću na stručnim savjetima i pomoći tijekom izrade završnog rada.

Komentoru Danijelu Šestanu na iskazanoj pomoći i vođenju kroz praktični dio rada te na savjetima za izradu i iskazivanje dobivenih rezultata u radu.

Dora Suličić



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:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Dora Suličić** Mat. br.: **0035200367**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje termostatirane kupelji**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Testing of thermostatic baths**

Opis zadatka:

Za potrebe umjeravanja mjerila temperature potrebno je ispitati radni prostor termostatirane kupelji, odnosno ispitati horizontalne i vertikalne gradijente te vremensku stabilnost temperature u njenom radnom prostoru. Vremensku stabilnost potrebno je odrediti u periodu od 30 minuta u svim ispitnim točkama. Ispitivanje alkoholne kupke Isotech 465 potrebno je provesti u temperaturnom području od -60 °C do 20 °C.

U radu je potrebno:

- Dati kratak opis kupelji sa skicama radnog prostora i shemama dijelova i elemenata regulacije.
- Opisati postupke za karakterizaciju zona kontrolirane temperature, što uključuje utvrđivanje horizontalnih i vertikalnih gradijenata, stalnosti i dinamike zagrijavanja/hlađenja.
- Definirati i opisati ispitni postupak sa skicom mjerne linije.
- Sastaviti mjernu liniju za ispitivanje koristeći postojeće uređaje i pomoćnu opremu koja je na raspolaganju u FSB-LPM.
- Priložiti rezultate ispitivanja s procijenjenim doprinosima značajnih utjecajnih faktora na ukupnu mjernu nesigurnost ispitivanja.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

29. studenog 2015.

Rok predaje rada:

- 1. rok:** 22. veljače 2019.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.
3. rok: 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obrane:

- 1. rok:** 25.2. - 1.3. 2019.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.
3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.

Zadatak zadao:


 Prof. dr. sc. Davor Zvizdić


 Dr. sc. Danijel Šestan

Predsjednik Povjerenstva:


 Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	IV
POPIS TABLICA	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
1. UVOD	1
2. ISPITIVANJE TERMOSTATSKIH KUPKI.....	2
2.1 Temperaturni gradijenti	3
3. ZONA UMJERAVANJA	4
3.1 Izotermalni blok.....	4
3.2 Kupka bez izotermalnog bloka	6
4. POPIS OPREME	8
4.1 Termostatirana kupka Isotech 465.....	9
4.2 Izotermalni blok.....	10
4.3 Termometri.....	11
4.4 Oprema za mjerenja otpora termometara.....	12
4.5 Računalo	14
5. POSTUPAK ISPITIVANJA	15
5.1 Okolišni uvjeti	15
5.2 Priprema mjerenja.....	16
5.3 Temperature ispitivanja	16
5.4 Određivanje stalnosti temperature.....	17
5.5 Horizontalna homogenost temperature	17
5.6 Vertikalna homogenost temperature.....	18
5.7 Ukupna mjerna nesigurnost u zoni umjeravanja	19
5.8 Prilagođeni postupak sa četiri termometra.....	19
6. REZULTATI ISPITIVANJA	21
6.1 Radijalna homogenost temperature	22
6.2 Aksijalna homogenost temperature.....	23
6.3 Stalnost temperature	24
6.4 Ukupna mjerna nesigurnost	26
7. ZAKLJUČAK	28
8. LITERATURA.....	29

POPIS SLIKA

Slika 1.	Prikaz temperaturnih gradijenata	3
Slika 2.	Izotermalni blok za termostatirane kupke.....	4
Slika 3.	Prikaz mogućih mjesta ispitivanja	5
Slika 4.	Primjer geometrije bloka.....	5
Slika 5.	Primjer razmještaja mjernih mjesta	7
Slika 6.	Skica mjerne linije	8
Slika 7.	Korišteni izotermalni blok	10
Slika 8.	Položaj provrta na izotermalnom bloku.....	10
Slika 9.	Termometrijski otpornički most sa svim spojenim komponentama	14
Slika 10.	Grafički prikaz mjerenja u programu LabView	14
Slika 11.	Položaj rupa na izotermalnom bloku.....	19
Slika 12.	Mjerna nesigurnost radijalne homogenosti	22
Slika 13.	Mjerna nesigurnost aksijalne homogenosti	23
Slika 14.	30 minutna stalnost temperature pri -60°C	24
Slika 15.	30 minutna stalnost temperature pri -20°C	24
Slika 16.	30 minutna stalnost temperature pri +20°C	24
Slika 17.	Mjerna nesigurnost stalnosti temperature	25
Slika 18.	Ukupna mjerna nesigurnost.....	27

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Primjer podataka o bloku	6
Tablica 2.	Primjer podataka o rupama	6
Tablica 3.	Primjer podataka o zoni umjeravanja.....	7
Tablica 4.	Tehnički podaci za kupku 915LW	9
Tablica 5.	Podaci o izotermalnom bloku.....	11
Tablica 6.	Tehnički podaci otporničkih termometara	11
Tablica 7.	Tehnički podaci multipleksora	12
Tablica 8.	Tehnički podaci upravljačke jedinice multipleksora.....	13
Tablica 9.	Tehnički podaci otporničkog mosta	13
Tablica 10.	Početni razjmeštaj termometara u rupama.....	20
Tablica 11.	Ispitne temperature i uvjeti okoliša	21
Tablica 12.	Homogenost temperature u radijalnom smjeru - rezultati	22
Tablica 13.	Homogenost temperature u aksijalnom smjeru - rezultati.....	23
Tablica 14.	Mjerna nesigurnost stalnosti temperature.....	25
Tablica 15.	Ukupna mjerna nesigurnost (-60°C).....	26
Tablica 16.	Ukupna mjerna nesigurnost (-20°C).....	26
Tablica 17.	Ukupna mjerna nesigurnost (+20°C).....	26

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
u	mK	Mjerna nesigurnost
a	mK	Poluinterval raspona očitavanja s pravokutnom razdiobom
ϑ	°C	Temperatura
T	K	Temperatura

SAŽETAK

Cilj ovog rada je ispitivanje karakteristika termostatske kupke s alkoholom (Isotech 465) u temperaturnom području $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, koju Laboratorij za procesna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje (FSB-LPM) koristi u svrhu umjeravanja mjerila temperature. Ispitivanje je izvršeno korištenjem četiriju etalonskih platinskih otporničkih termometra prema internoj metodi laboratorija. Detaljno su opisani provedeni postupci i metode ispitivanja. Na osnovi rezultata ispitivanja izračunat je doprinos kupke u ukupnoj mjernoj nesigurnosti kada se ona upotrebljava za umjeravanje termometara. Rezultati ispitivanja dani su na kraju rada u tabličnom i grafičkom prikazu.

Ispitivanje je obuhvatilo određivanje karakteristika kupki što uključuje radijalne i aksijalne temperaturne gradijente, vremensku stalnost temperature te dinamiku zagrijavanja, odnosno hlađenja.

Ključne riječi: termostatska kupka, temperaturni gradijenti, vremenska stabilnost temperature, mjerna nesigurnost

SUMMARY

The aim of this work is an examination of characteristics of the thermostated bath filled with ethanol (Isotech 465), which is used for calibration of thermometers in Laboratory for Process Measurement at Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture (FSB-LPM). The bath characteristics were examined using four calibrated standard platinum resistance thermometers, in accordance to internal laboratory procedure. The temperature range covered by this examination was from -60 °C to 20 °C. In this work, the procedures and methods used for bath examination are described in detail. Based on the examination results, the bath contribution to combined measurement uncertainties of subsequent thermometer calibrations are calculated, and the results are given in tabular and graphic form at the end of this paper. The examined characteristics of the bath includes radial and axial temperature gradients, temperature stability and dynamics of heating and cooling.

Keywords: thermostatic bath, temperature gradients, time temperature stability, measurement uncertainty

1. UVOD

Tema je završnog rada ispitivanje karakteristika termostatisane kupke koja se koristi kao zona kontrolirane temperature za umjeravanje termometara. Kupka koja se ispituje jest alkoholna kupka Isotech 465 (s etanolom kao radnim medijem) u temperaturnom rasponu od $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

U svrhu preciznog umjeravanja termometara potrebno je odrediti mjerne nesigurnosti koje se pojavljuju pri umjeravanju, a to je moguće samo ako poznamo svojstva i ponašanje kupke u zadanim uvjetima. Najbitnija svojstva koja je potrebno ispitati su homogenost i stalnost temperature. Može se još odrediti i dinamika zagrijavanja, odnosno hlađenja, ali nije prijeko potrebno.

Temperaturna homogenost određuje se iz horizontalnih i vertikalnih, odnosno radijalnih i aksijalnih gradijenata koji se očituju u razlici temperature unutar radnog volumena kupke. Stalnost se temperature određuje iz njenih oscilacija u određenom vremenskom periodu za zadane uvjete.

Laboratoriji često provode vlastita ispitivanja kupki iz više razloga. Prvi je taj što podaci dani od strane proizvođača mogu biti nepotpuni i nedovoljno precizni za određivanje nesigurnosti umjeravanja termometara. Neovisno o preciznosti danih podataka od proizvođača, u eksploataciji može doći do oštećenja i promjene karakteristika dijelova opreme, odnosno kupke, te je potrebno raditi periodička ispitivanja kako bi se utvrdile eventualne promjene i uzele u obzir kod umjeravanja termometara.

U ovom završnom radu korištena je interna metoda Laboratorija za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

2. ISPITIVANJE TERMOSTATSKIH KUPKI

Kupke se ispituju s ciljem utvrđivanja njihovih svojstava. Podaci o svojstvima kupki iz kataloga mogu često biti nepotpuni i nedovoljno precizni pa iz tog razloga laboratoriji provode vlastita ispitivanja kupki za umjeravanja termometara. Također ne postoji standardizirani postupak ispitivanja pa mjeritelji sami odabiru najpogodniju metodu mjerenja. Kada bi i postojao takav postupak da svatko može u katalogu očitati tražene podatke, svejedno bi se trebala provoditi periodička ispitivanja zbog mogućih promjena svojstava u toku eksploatacije.

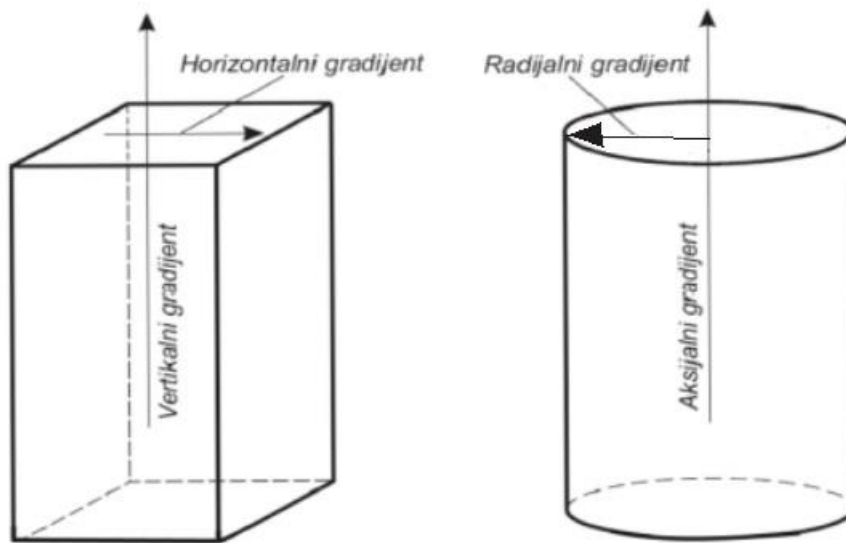
Najvažnija ispitivana svojstva su homogenost i stalnost temperature, a može se još ispitivati i dinamika zagrijavanja, odnosno hlađenja, ali nije nužno.

Homogenost temperature prvenstveno ovisi o konstrukciji kupke, njejoj veličini, izolaciji, smještaju grijača te načinu cirkulacije medija. Određuje se iz temperaturnih gradijenata unutar kupke koji se u provedenoj metodi definiraju kao horizontalni i vertikalni, a u slučaju kada je termostatirana kupka cilindričnog oblika ili se ispitivanje vrši uporabom cilindričnog izotermalnog bloka, primjerenije je govoriti o radijalnim i aksijalnim gradijentima.

Metoda korištena u ovom radu razvijena je u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu i biti će detaljnije obrađena u daljnjem tekstu.

Bitno je napomenuti kako nijedan postupak umjeravanja ne može zamijeniti radnika s iskustvom u radu s određenim kupkama, te da ne postoji idealan postupak umjeravanja koji bi bio idealno vremenski stabilan, bez temperaturnih gradijenata i mjernih nesigurnosti.

2.1 Temperaturni gradijenti



Slika 1. Prikaz temperaturnih gradijenata

Temperaturni gradijent predstavlja promjenu temperature u smjeru normale na izotermnu plohu. To je zapravo vektor okomit na izotermnu plohu, s pozitivnim, odnosno negativnim predznakom u smjeru promjene temperature. Numerički izraženo, temperaturni gradijent jednak je derivaciji temperature ϑ po normali n :

$$\text{grad } \vartheta = \vec{n}_0 \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\Delta \vartheta}{\Delta n} = \vec{n}_0 \cdot \frac{d\vartheta}{dn}$$

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

$d\vartheta/dn$ – skalarna veličina temperaturnog gradijenta izražena u K/m

Gradijent temperature unutar termostatisirane kupke ili peći očituje se u promjeni temperature termometra zbog promjene njegovog položaja unutar same zone umjeravanja. Unaprijed definirane pozicije unutar zone ispitivanja su još predmet istraživanja i ne postoje kao takve, već se odabiru shodno odabranoj metodi ispitivanja.

3. ZONA UMJERAVANJA

Zona umjeravanja je imaginarno prostorno područje unutar radnog prostornog područja kupke u kojem su smješteni etalonski termometri i oni koje želimo umjeriti. Prilikom umjeravanja termometara može se koristiti izotermalni blok s rupaka (Slika 2) i tada zona umjeravanja obuhvaća blok i njegove rupe. Ako je bilo koji drugi element smješten u kupku, zona umjeravanja jest prostor obuhvaćen tim elementom. U sklopu ovog rada biti će obrađen slučaj s korištenjem izotermalnog bloka.

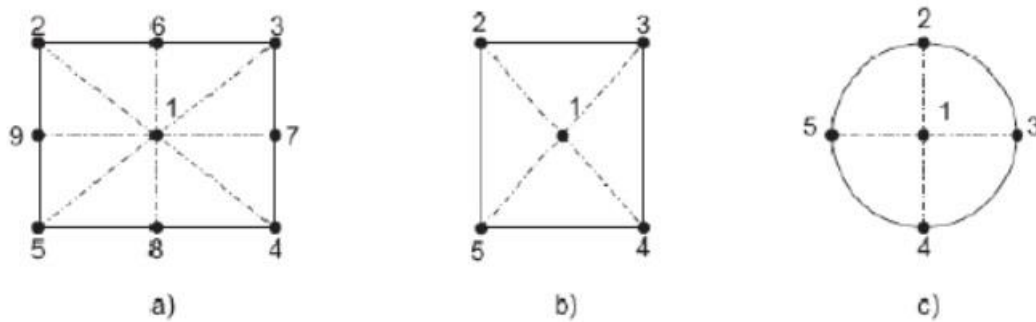
3.1 Izotermalni blok



Slika 2. Izotermalni blok za termostatirane kupke

Izotermalni blok koji je u okviru ovog rada bio postavljen u radni volumen ispitivane kupke. Izrađen je od bakra, cilindričnog je oblika, s izbušena četiri provrta koji služe za prihvat termometara, a prikazan je na slici 2. Razlike temperatura između provrta predstavljaju temperaturne gradijente, a izračunavaju se na način da se termometri tijekom ispitivanja premještaju iz jednog u drugi provrt. Ovim postupkom omogućeno je precizno određivanje razlika temperatura u pojedinim provrtima izotermalnog bloka bez obzira na međusobna odstupanja korištenih termometara i nesigurnost njihovog umjeravanja.

Mjesta ispitivanja unutar zone umjeravanja odabiru se prema obliku same zone i iskustveno jer ne postoje unaprijed definirana mjesta za smještaj termometara. Neki od mogućih razmještaja prikazani su na slici 3:

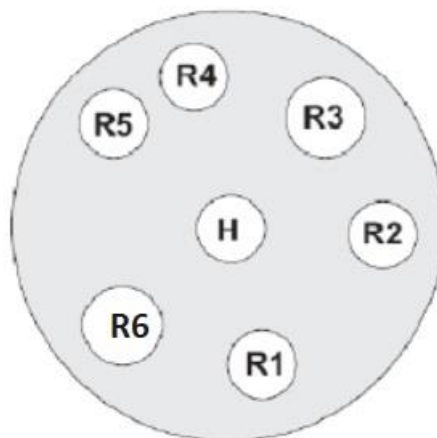


Slika 3. Prikaz mogućih mjesta ispitivanja

Uz podatke o samoj geometriji bloka potrebno je definirati dodatne podatke:

- Smještaj bloka unutar kupke, npr. u sredini, 20 mm od dna i slično
- Dimenzije kupke, npr. dubina
- Rupe koje su izostavljene iz procesa ispitivanja
- Rupe koje se ne koriste za potrebe ispitivanja, nego za rukovanje i pozicioniranje bloka
- Materijal pokrova gornje strane bloka, npr. polistiren, keramička vuna i slično

Primjer tlocrtne geometrije bloka prikazan je na Slici 4, a podaci o bloku i rupama u Tablicama 1 i 2:



Slika 4. Primjer geometrije bloka

Tablica 1. Primjer podataka o bloku

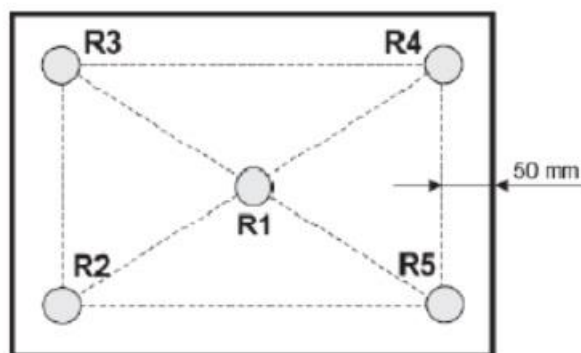
Izotermalni blok	
Materijal	Bakar
Promjer, mm	100
Visina, mm	250
Dubina rupa, mm	230
Referentna rupa	R1

Tablica 2. Primjer podataka o rupama

Rupe	Promjer, mm
R1	10,5
R2	10,5
R3	15
R4	11
R5	11
R6	15
H (za rukovanje)	10

3.2 Kupka bez izotermalnog bloka

Iako se ova metoda nije koristila pri mjerenjima u ovom radu, dana je kratka teorijska pozadina o takvom načinu mjerenja. U ovom slučaju geometrija zone umjeravanja treba biti određena sa podacima o veličini zone i točnoj poziciji termometara u njoj. Primjer takve zone prikazan je na Slici 5, gdje isprekidana linija predstavlja granicu zone, a njene dimenzije dane su u Tablici 3:



Slika 5. Primjer razmještaja mjernih mjesta

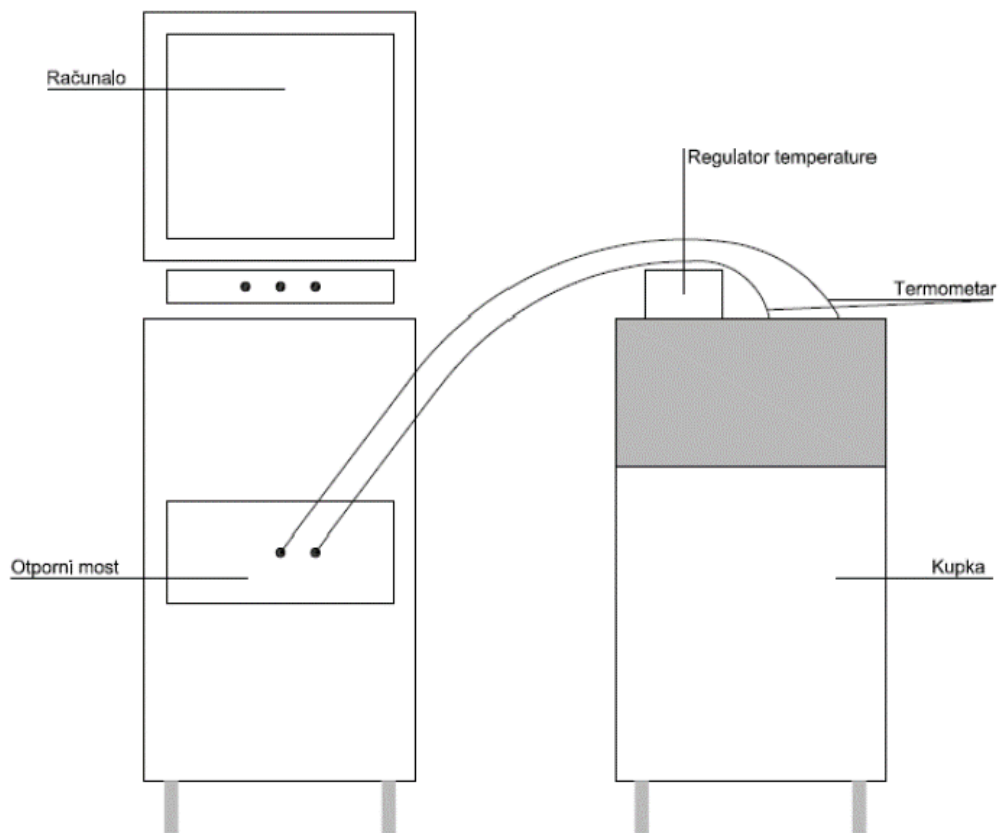
Tablica 3. Primjer podataka o zoni umjeravanja

Dimenzije	Zona umjeravanja, mm	Radni volumen, mm
Dužina	150	250
Širina	120	220
Dubina	240	300
Referentna rupa	R1	

4. POPIS OPREME

Sva oprema korištena za ispitivanje kupke, kao i sama kupka, smještena je u prostorijama Laboratorija za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Skica mjerne linije prikazana je na Slici 6:



Slika 6. Skica mjerne linije

4.1 Termostatorana kupka Isotech 465

Isotech 465 je kupka visoke temperaturne stalnosti i homogenosti s ugrađenom jedinicom za grijanje te vanjskom jedinicom za hlađenje. Deklarirana temperaturna stalnost kupke u čitavom njenom radnom području je manja od $\pm 0,010$ °C. Opremljena je regulatorom temperature visokih performansi s mikroprocesorom i PID regulacijom. Ovim regulatorom istog proizvođača moguće je podesiti parametre poput radne temperature i upozorenja za maksimalnu i minimalnu temperaturu. Minimalni korak kod odabira radne temperature iznosi 0,01 °C.

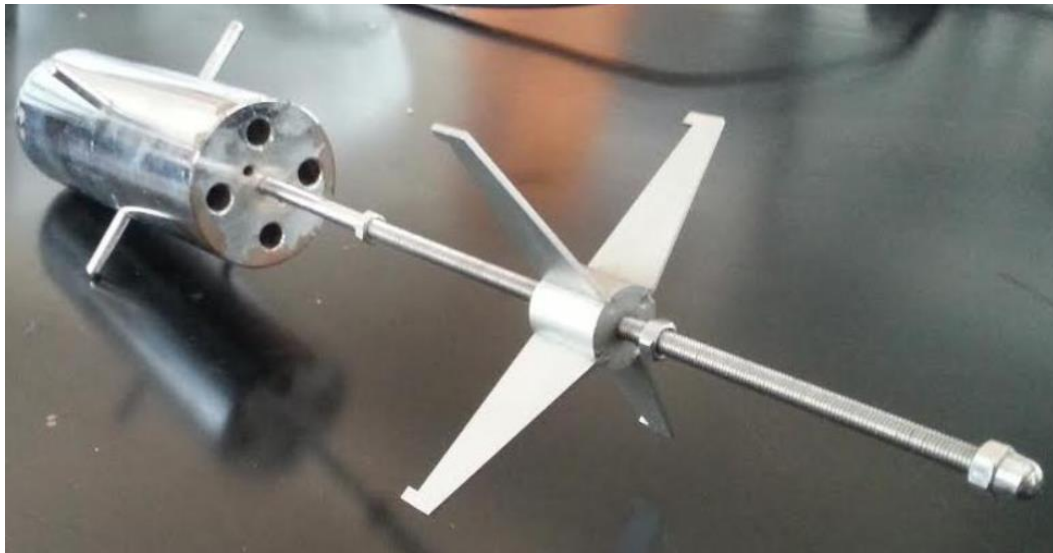
Ispitivanje je provedeno sa etanolom kao radnim medijem u kupki, te je za definiranje zone umjeravanja korišten izotermalni blok. Kupka je prikazana na Slici 7, a tehničke su specifikacije dane u Tablici 4:

Tablica 4. Tehnički podaci za kupku 915LW

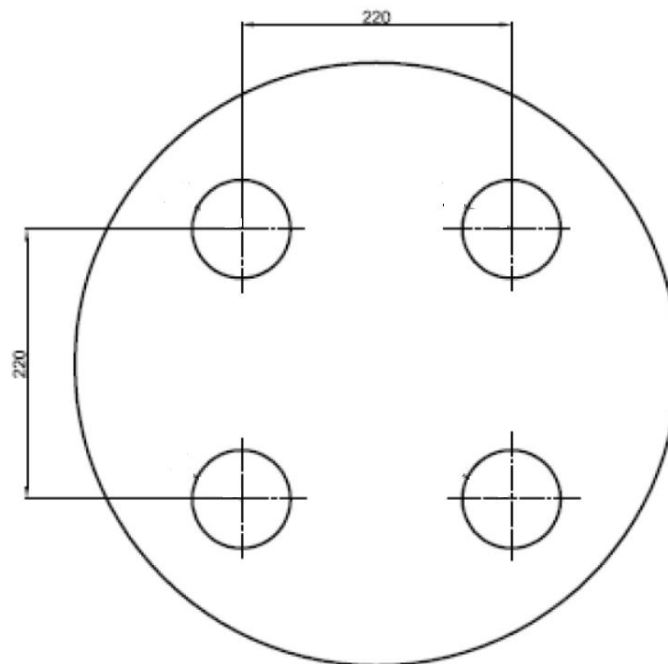
Proizvođač	Isotech	
Model	465	
Temperaturno područje primjene	alkohol	-65 °C do 40 °C
Kapacitet radnog medija	7 litara	
Dimenzije	visina	1020 mm
	širina	580 mm
	dužina	640 mm
Dimenzije unutrašnjosti kupke	promjer	98 mm
	dubina	400 mm
Masa	90 kg	
Snaga	1 kW + 1 kW	
Napajanje	220 V; 50 Hz	

4.2 Izotermalni blok

Izotermalni blok izrađen je od brakra te presvučen tankim slojem nikla. Promjer provrta je 8 mm, a razmak između osi provrta je 220 mm. Cijeli blok i položaj provrta prikazani su na slikama 7. i 8., a dimenzije su dane u tablici 5.:



Slika 7. Korišteni izotermalni blok



Slika 8. Položaj provrta na izotermalnom bloku

Tablica 5. Podaci o izotermalnom bloku

Izotermalni blok	
Materijal	Bakar
Promjer, mm	51
Visina, mm	150
Dubina rupa, mm	120
Promjer rupa, mm	8
Referentna rupa	R1

4.3 Termometri

U ispitivanju su korišteni etalonski otpornički termometri internih oznaka TEPOT19, TEPOT20, TEPOT21 i TEPOT22.

Termometre su umjereni u termometrijskim fiksnim točkama prema međunarodnoj temperaturnoj ljestvici ITS-90 u području od $-189.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (trojna točka argona) do $660.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (krutište aluminija). Oblikom su predviđeni za umetanje u radni fluid ili u provrt u krutom tijelu. Povezuje se s termometrijskim otporničkim mostom pomoću četiri žice.

Tehnički podaci o termometrima dani su u Tablici 8:

Tablica 6. Tehnički podaci otporničkih termometara

Proizvođač	HART Scientific	
Model	5628	
Nominalni otpor	25.5 Ω	
Broj komada	4	
Dimenzije osjetnika	duljina	30 mm
Dimenzije zaštitne cijevi	Promjer	6.35 mm
	duljina	508 mm
Godišnja stabilnost	3.5 mK	

4.4 Oprema za mjerenja otpora termometara

Oprema za mjerenje otpora termometara, korištena u ispitivanju, sastavljena je od sljedećih komponenti:

- ASL 158 (EOMOS03/01 - multipleksor)
- ASL 148 (EOMOS03/02 – komunikacijska i upravljačka jedinica multipleksora)
- ASL F700 (EOMOS03/03 – termometrijski otpornički most).

Za mjerenje otpora platinskih otporničkih termometara odabran je izmjenični otpornički most F700 proizvođača ASL Limited. Kako bi otporni most mogao mjeriti otpore više termometara, na njega je priključen multipleksor ASL 158 istog proizvođača.

Mjerenje otpora termometara omogućeno je kombinacijom mosta s multipleksorom i etalonskim fiksnim otporom. Komunikacijskim sučeljem GPIB most je spojen s računalom. Program LabView na računalu kontrolira rad multipleksora, očitava otpor s mosta i preračunava ga u pripadajuću temperaturu.

Tehničke specifikacije komponenata dane su u Tablicama 7., 8. i 9., te je na Slici 9. prikazan kompletni most sa spojenim termometrima:

Tablica 7. Tehnički podaci multipleksora

Proizvođač	ASL	
Model	SB 158	
Napajanje	220/240 Vac	
Frekvencija	47 – 63 Vac	
Max Va	60 Va	
Dimenzije	visina	88 mm
	dužina	295 mm
	širina	442 mm
Težina	7 kg	

Tablica 8. Tehnički podaci upravljačke jedinice multipleksora

Proizvođač	ASL	
Model	SB 148	
Napajanje	220/240 Vac	
Frekvencija	47 – 63 Vac	
Dimenzije	visina	133 mm
	dužina	295 mm
	širina	442 mm
Težina	7 kg	

Multipleksor ASL SB 148 (EOMOS03/02) i ASL 158 (EOMOS03/01) omogućava proširenje mjernih mjesta na ukupno 10 kanala. Na svaki kanal može se spojiti po jedan termometar. ASL F700 (EOMOS03/03) omogućava izvođenje vrlo preciznih mjerenja. Jedan je od najzastupljenijih u svijetu otporničkih termometrijskih mostova u laboratorijima za umjeravanje.

Tablica 9. Tehnički podaci otporničkog mosta

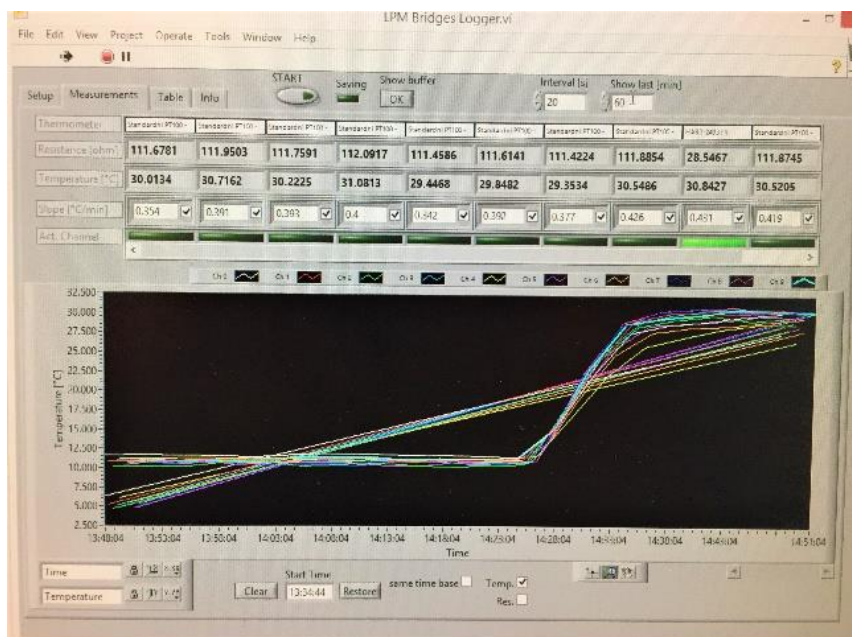
Proizvođač	ASL	
Model	F 700	
Napajanje	240/220/120/100 Vac	
Frekvencija	50 – 60 Hz	
Dimenzije	visina	155 mm
	širina	520 mm
	dužina	466 mm
Težina	15 kg	
Radni uvjeti	0 °C – 30 °C, 10 % - 90 % RH	
Vrijeme mjerenja	10 sekundi za potpuni balans	
Linearnost	< ±1 zadnja decimala (1 ppm)	
Točnost	0,25 mK puni raspon/ 6 mK do 1064°C ovisno o otporu	



Slika 9. Termometrijski otpornički most sa svim spojenim komponentama

4.5 Računalo

Računalo smo koristili za kontrolu rada multipleksora i mosta, za očitavanja otpora s mosta i preračunavanje istih u pripadajuće temperature te za spremanje i obradu očitanih podataka. Program LabView kontrolira rad multipleksora te očitava otpor s mosta i preračunava ga u pripadajuću temperaturu, te je on instaliran na računalu. Sučelje je prikazano na Slici 32:



Slika 10. Grafički prikaz mjerenja u programu LabView

5. POSTUPAK ISPITIVANJA

Postupak ispitivanja je sljedeći:

1. Od sobne temperature do prve točke testiranja – promatra se pad temperature (uz eventualno bilježenje promjena) sve do stabilizacije temperature koja može potrajati 20 do 30 minuta
2. Točka ispitivanja – nakon stabilizacije temperature, određuju se homogenost (horizontalni i vertikalni gradijenti) i stalnost temperature
3. Zagrijavanje, odnosno hlađenje do sljedeće ispitne temperature (uz možebitno bilježenje promjena) sve do ponovne stabilizacije na novoj temperaturi

Detaljan opis provedenih mjerenja sa tabličnim i grafičkim prikazima rezultata dan je u nastavku rada.

Prije samog ispitnog postupka potrebno je zadovoljiti zadane okolišne uvjete u laboratoriju i provesti pripremu merenja.

5.1 Okolišni uvjeti

Za ispravnu provedbu postupka mjerenja u laboratoriju trebaju tijekom svakog mjerenja biti zadovoljeni sljedeći okolišni uvjeti:

- Temperatura zraka između +15 °C i +35 °C uz oscilacije od maksimalno ± 3 °C tijekom čitavog mjerenja
- Relativna vlažnost tijekom mjerenja mora biti između 25 % RH i 75 % RH

5.2 Priprema mjerenja

Priprema za provedbu mjerenja:

- Postavljanje uređaja za praćenje stanja okoliša termostatisane kupke uz vrijeme stabilizacije otprilike 15 minuta
- Pregled ispitne kupke i prekid ispitivanja ukoliko se ustanovi da ga nije moguće provesti, isto tako moguća obustava ispitivanja ako se tijekom mjerenja zaključi da je ono postalo nemoguće ili opasno
- Određivanje temperaturnih točaka ispitivanja u dogovoru sa naručiteljem
- Izrada jednoznačne skice rasporeda prostornih točaka (mjesta) unutar kupke u kojima će se mjerenje vršiti
- Priprema termometara i ostale opreme potrebne za provednu ispitivanja

5.3 Temperature ispitivanja

Za određen raspon temperature umjeravanja, ispitivanje mora biti provedeno pri minimalno tri temperature:

- Krajnje temperature raspona (najviša i najniža)
- Srednja temperatura raspona

Mogu se odabrati i dodatne temperature unutar raspona radi boljeg uvida u ponašanje zone i veće točnosti postupka umjeravanja.

Ako je temperaturni raspon umjeravanja malen ili ako se zona koristi za jednu određenu temperaturu, dovoljne su dvije ili samo jedna točka ispitivanja.

Raspon temperature odnosi se na dio zone koji se koristi za umjeravanje termometra.

5.4 Određivanje stalnosti temperature

Jedan od termometara postavlja se u proizvoljni provrt RX (može se odabrati i referentna pozicija RR) te se čeka dok se temperatura mjerenja ne ustali (dovede u stacionarno stanje). Potom se temperatura bilježi u kratkim vremenskim intervalima u periodu od 10 i 30 minuta, tzv. 10 i 30 minutna stalnost temperature.

Za svaku ispitnu temperaturu rezultati se mogu prikazati u tabličnom i grafičkom obliku.

Doprinos mjernoj nesigurnosti umjeravanja termometara zbog nestabilnosti temperature u radnom volumenu kupke određuje se pomoću sljedeće formule:

$$u_{stalnost} = \frac{1}{\sqrt{3}} (T_{avg} - |T_{max,min}|)$$

gdje je: T_{avg} – srednja temperatura unutar 10 ili 30 minuta

$T_{max,min}$ – najveća ili najmanja temperatura očitana unutar 10 ili 30 minuta

5.5 Horizontalna homogenost temperature

Za određivanje gradijenata temperature u horizontalnom smjeru potrebna su dva ili više sličnih termometara S1, S2, itd. koji ne trebaju nužno biti umjereni. Jedan se postavi na referentnu poziciju RR, ili rupu u slučaju korištenja izotermalnog bloka, a drugi u neku drugu poziciju (R2, R3, itd.). Nakon postizanja stacionarnog stanja (cca 20 minuta) rezultat se bilježi, termometrima se zamjenjuje pozicija (onaj iz RR se stavlja u RX i obrnuto) i mjerenje se ponavlja. Na taj se način poništavaju razlike među dva termometra S1 i S2.

Temperaturni gradijent između pozicija R1 i R2 računa se pomoću izraza:

$$d\vartheta = \vartheta(R2) - \vartheta(R1) = \frac{[\vartheta(R2, S1) - \vartheta(R1, S2)] + [\vartheta(R2, S2) - \vartheta(R1, S1)]}{2}$$

Postupak se ponavlja za preostale pozicija pri čemu je jedan termometar (S1 ili S2) uvijek na referentnoj poziciji (RR).

Referentna pozicija može biti bilo koja od mogućih, pa je opći izraz:

$$d\vartheta = \vartheta(RX) - \vartheta(RR) = \frac{[\vartheta(RX, S1) - \vartheta(RR, S2)] + [\vartheta(RX, S2) - \vartheta(RR, S1)]}{2}$$

Pozitivan gradijent $d\vartheta$ znači da je pozicija RX na višoj temperaturi od referentne pozicije RR i obratno.

Nakon što se odrede temperaturni gradijenti između svih provrta, odabire se najveći gradijent tražene temperature za računanje mjerne nesigurnosti u horizontalnom smjeru prema izrazu:

$$u_h = \frac{d\vartheta_{max}}{\sqrt{3}}$$

Za sve ispitne temperature izračunate nesigurnosti proizašle iz horizontalnih temperaturnih gradijenata mogu biti prikazane u tabličnom i grafičkom obliku.

5.6 Vertikalna homogenost temperature

Za određivanje vertikalnih gradijenata temperature koriste se dva slična termometra S1 i S2. Termometar S1 postavlja se na referentnu poziciju (RR), a termometar S2 na neku drugu poziciju RX, po mogućnosti što bliže referentnoj. Prvo su oba termometra uronjena do najniže točke mjerenja, tj. do dna rupe izotermalnog bloka (točka $h=0$). Nakon stabilizacije temperature, očitava se temperatura i termometar S2 se vertikalno podiže do visine $h=50$ mm od $h=0$ u koracima od po 10mm i na kraju se ponovno vraća u točku $h=0$. termometar S1 ostaje na referentnoj poziciji u najnižoj točki mjerenja ($h=0$) tokom cijelog postupka. Na svakom od položaja se čeka stabilizacija temperature, očitaju se mjerenja oba termometra te se utvrdi razlika $\vartheta(RX, S2) - \vartheta(RR, S1)$. razlike se prvo normaliziraju oduzimanjem početnog radijalnog gradijenta (RX-RR) kod $h=0$. Maksimalni se aksijalni gradijent određuje kao najveća razlika između svih utvrđenih normaliziranih razlika.

Ako je moguće, treba koristiti ispitne otporničke termometre sa što manjom dužinom odjetnika ili termoparove.

Mjerna nesigurnost u vertikalnom smjeru za traženu temperaturu računa se po izrazu:

$$u_v = \frac{d\vartheta_{max}}{\sqrt{3}}$$

Za sve testne temperature izračunate nesigurnosti proizašle i aksijalnih temperaturnih gradijenata mogu biti prikazane u tabličnom i grafičkom obliku.

5.7 Ukupna mjerna nesigurnost u zoni umjeravanja

Za svaku ispitnu temperaturu potrebno je prikazati ukupan doprinos zone umjeravanja proračunu mjerne nesigurnosti kod budućeg umjeravanja termometara, tj. ukupnu mjernu nesigurnost.

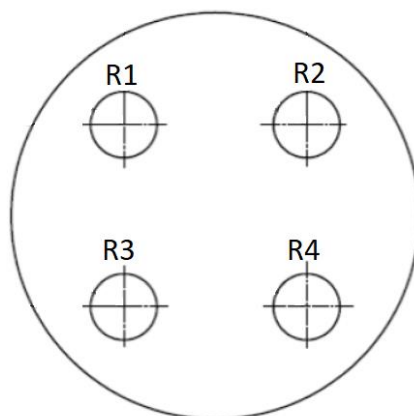
Ukupna mjerna nesigurnost temperature u zoni umjeravanja računa se po sljedećem izrazu:

$$u_{komb} = \sqrt{u_{horizontalno}^2 + u_{vertikalno}^2 + u_{stalnost}^2}$$

5.8 Prilagođeni postupak sa četiri termometra

Budući da je ispitivanje izvedeno pomoću četiri termometra, bilo je potrebno prilagoditi opisanu metodu koja koristi dva termometra.

Položaja rupa na bloku prikazana je na slici 11., a početni razmještaj termometara prije prvog mjerenja prikazan je u tablici 10.:



Slika 11. Položaj rupa na izotermalnom bloku

Tablica 10. Početni razmještaj termometara u rupama

Rupa	Termometar
R1 (RR)	TEPOT22
R2	TEPOT20
R3	TEPOT19
R4	TEPOT21

Referentna rupa je rupa R1.

Za mjerenje radijalnih gradijenata potrebno je izvršiti dvije zamjene termometara, prvo dijagonalna pa vodoravna, te se nakon svake zamijene bilježe temperatura i razmještaj termometara. Izračunaju se tri gradijenta dobivena iz mjerenja, dva u odnosu na referentnu rupu i jedan između dvije druge rupe te se iz tih podataka zbrajanjem, odnosno oduzimanjem dobija treći potrebni gradijent u odnosu na referentnu rupu, tada su svi gradijenti definirani.

Kod mjerenja aksijalnih gradijenata termometar TEPOT22 stoji na dnu u referentnoj rupi (R1), a ostala tri termometra se podižu u koracima od 20 mm (raspon mjernog područja senzora je 20 mm) do visine od 40 mm iznad početne. Bilježe se temperature i izračunavaju gradijenti za svaku rupu.

6. REZULTATI ISPITIVANJA

Ispitivanje kupke je provedeno u temperaturnom području od $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Odabrane ispitne temperature uz uvjete okoliša za vrijeme mjerenja prikazane su u tablici 11:

Tablica 11. Ispitne temperature i uvjeti okoliša

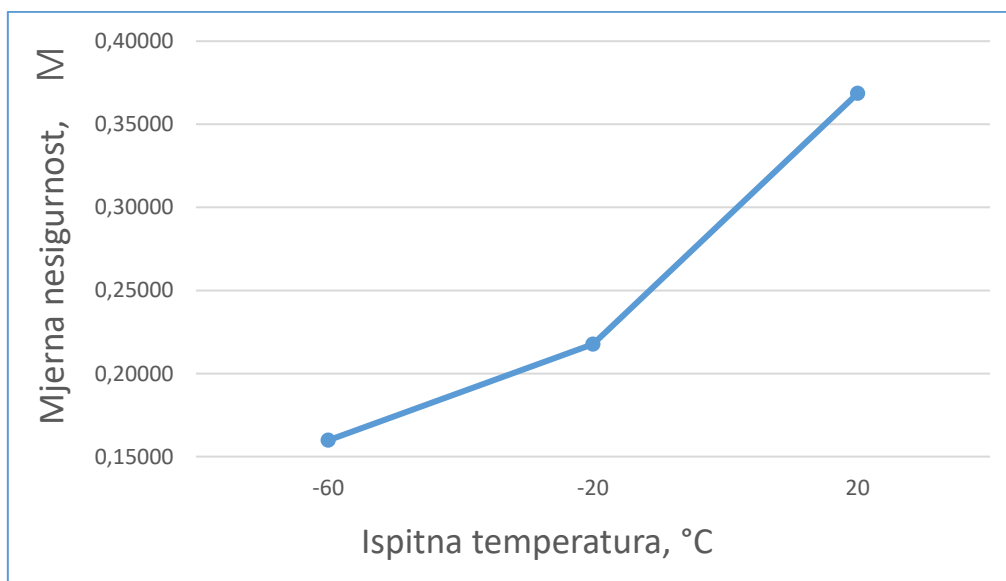
Ispitna temperatura	Temperatura okoliša	Relativna vlažnost
$-60\text{ }^{\circ}\text{C}$	$27,1\text{ }^{\circ}\text{C}$	25,5 %
$-20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$25,0\text{ }^{\circ}\text{C}$	24,5 %
$+20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$22,4\text{ }^{\circ}\text{C}$	30,0 %

Rezultati mjerenja horizontalne i vertikalne homogenosti te stalnosti temperature prikazani su u tabličnom i grafičkom obliku.

6.1 Radijalna homogenost temperature

Tablica 12. Homogenost temperature u radijalnom smjeru - rezultati

Ispitna temperatura, °C	Najveće odstupanje a , mK	Mjerna nesigurnost u , mK
-60 °C	0,28	0,16
-20 °C	1,38	0,22
20 °C	0,64	0,37
Max. vrijednost	0,64	0,37

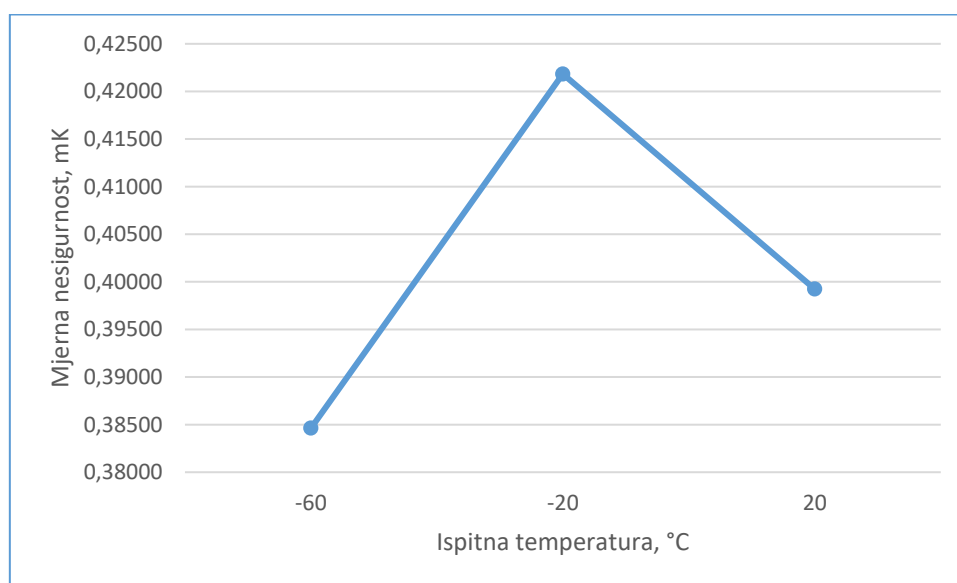


Slika 12. Mjerna nesigurnost zbog radijalne nehomogenosti

6.2 Aksijalna homogenost temperature

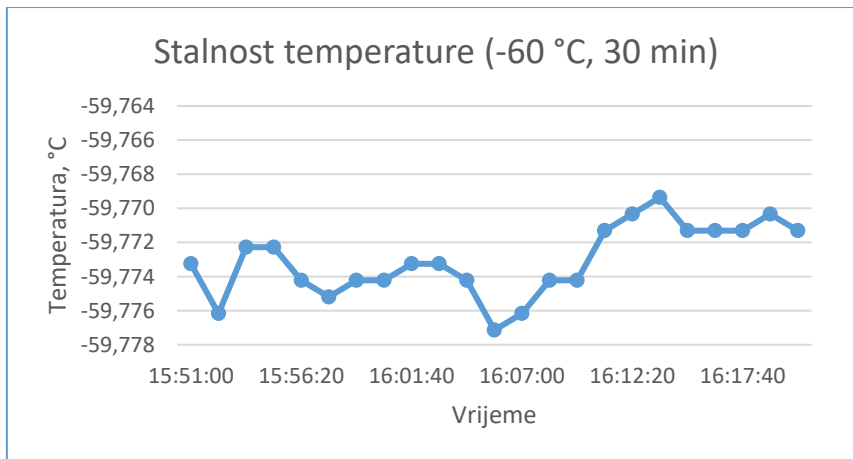
Tablica 13. Homogenost temperature u aksijalnom smjeru - rezultati

Ispitna temperatura, °C	Najveće odstupanje a , mK	Mjerna nesigurnost u , mK
-60 °C	0,67	0,38
-20 °C	0,73	0,42
+20 °C	0,69	0,40
Max. vrijednost	0,69	0,40

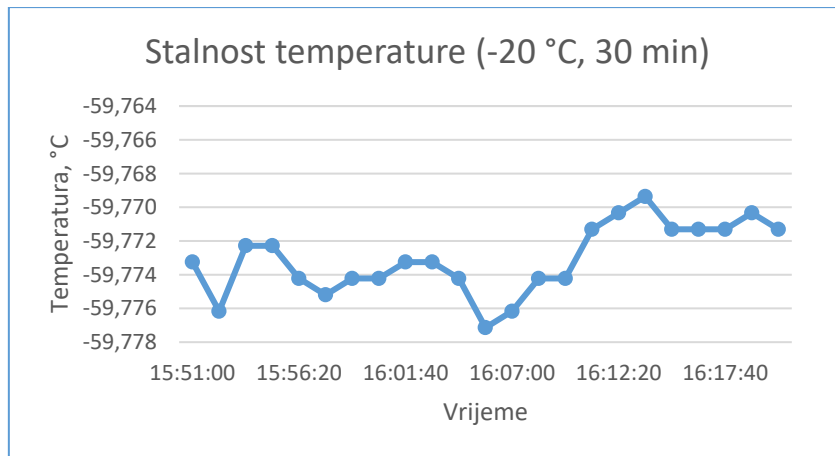


Slika 13. Mjerna nesigurnost aksijalne homogenosti

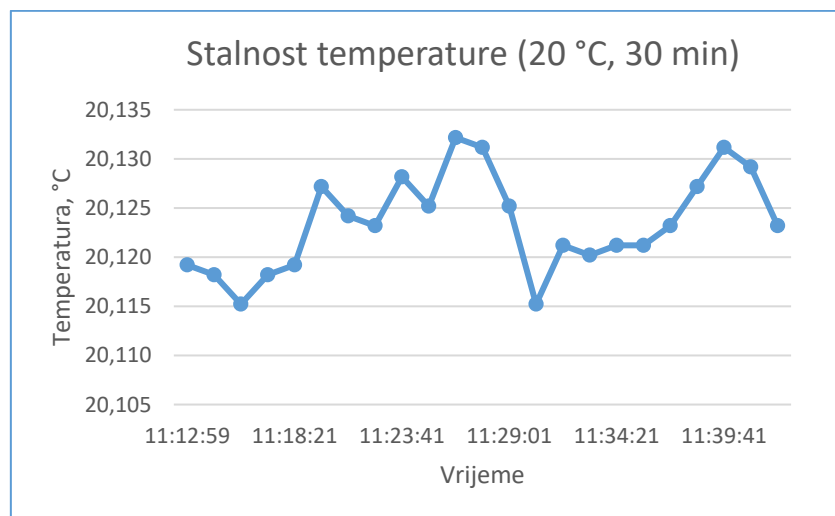
6.3 Stalnost temperature



Slika 14. 30 minutna stalnost temperature pri -60 °C



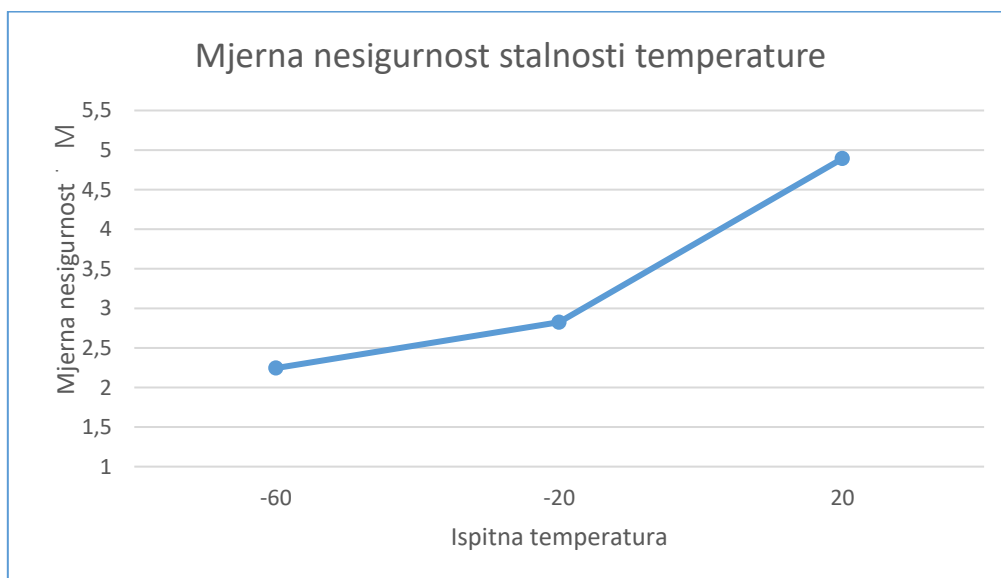
Slika 15. 30 minutna stalnost temperature pri -20 °C



Slika 16. 30 minutna stalnost temperature pri 20 °C

Tablica 14. Mjerna nesigurnost stalnosti temperature

Rupa	RR=R1	Senzor	TEPOT04
Rezultati			
Ispitna temperatura [°C]	Raspon [mK]	a [mK]	Mjerna nesigurnost u [mK]
-60°C	8	4	2,2
-20°C	9,8	4,9	2,8
+20°C	17	8,5	4,9
Max. vrijednost	17	8,5	4,9



Slika 17. Mjerna nesigurnost stalnosti temperature

6.4 Ukupna mjerna nesigurnost

Tablica 15. Ukupna mjerna nesigurnost (-60 °C)

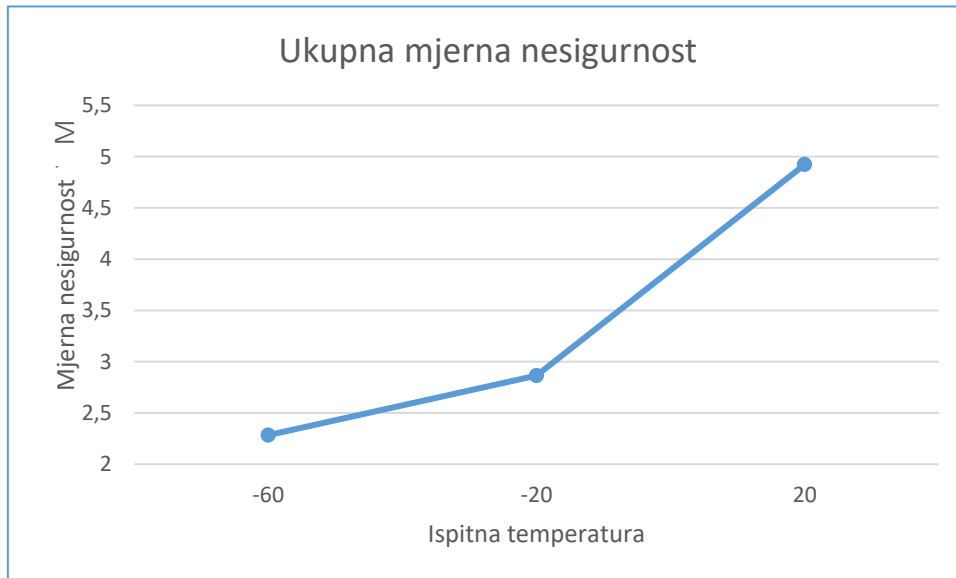
Ispitna temperatura	-60 °C	915LW	
Izvor nesigurnosti	Distribucija	<i>a</i> mK	<i>u</i> mK
Radijalni gradijenti	Pravokutna	0,28	0,16
Aksijalni gradijenti	Pravokutna	0,67	0,39
Stalnost temperature	Pravokutna	3,89	2,25
Kombinirana nesigurnost	k=1		2,28
Proširena nesigurnost	k=2		4,56

Tablica 16. Ukupna mjerna nesigurnost (-20°C)

Ispitna temperatura	-20 °C	915LW	
Izvor nesigurnosti	Distribucija	<i>a</i> mK	<i>u</i> mK
Radijalni gradijenti	Pravokutna	0,38	0,22
Aksijalni gradijenti	Pravokutna	0,73	0,42
Stalnost temperature	Pravokutna	4,89	2,83
Kombinirana nesigurnost	k=1		2,86
Proširena nesigurnost	k=2		5,72

Tablica 17. Ukupna mjerna nesigurnost (20°C)

Ispitna temperatura	20 °C	915LW	
Izvor nesigurnosti	Distribucija	<i>a</i> mK	<i>u</i> mK
Radijalni gradijenti	Pravokutna	0,64	0,37
Aksijalni gradijenti	Pravokutna	0,69	0,40
Stalnost temperature	Pravokutna	8,47	4,89
Kombinirana nesigurnost	k=1		4,92
Proširena nesigurnost	k=2		9,84



Slika 18. Ukupna mjerna nesigurnost

7. ZAKLJUČAK

Ispitivanja termostatiranih kupki provode se sa svrhom preciznog određivanja njihovih svojstava i ponašanja u zadanim uvjetima u kojima će se one kasnije upotrebljavati za umjeravanja termometara. Rezultati ispitivanja uvelike ovise o kvaliteti korištene kupke, preciznosti etalonskih ispitnih termometara kao i ostaloj korištenoj opremi pri mjerenju.

Iz rezultata prezentiranih ovim radom vidljivo je da najveći utjecaj na mjernu nesigurnost ima nestabilnost temperature koja se kretala u rangu $\pm 0,1$, te je za red veličine većeg iznosa od one uzrokovane gradijentima temperature unutar kupke.

Ispitivanje kupke uspješno je provedeno u Laboratoriju za procesna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, a rezultati ispitivanja koristit će se u svrhu budućih umjeravanja termometara. Iz rezultata je vidljivo da se kupka može koristiti i u slučajevima kada se zahtijeva mala nesigurnost umjeravanja u zadanom temperaturnom području.

Bitno je napomenuti da osim kvalitetne opreme i iskustvo mjeritelja ima veliku važnost pri laboratorijskim mjerenjima, što nije moguće zamijeniti niti jednim postupkom ili automatizacijom.

Važno je naglasiti i kako bi od velike koristi bilo uvođenje međunarodno priznatog i standardiziranog postupka ispitivanja kupki ili peći koje se koriste u svrhu umjeravanja termometara. Tada bi svatko mogao imati uvid u tražene podatke iz kataloga proizvođača, što je korisno kako za potrošače, tako i za proizvođače mjerne opreme.

8. 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] Fran Bošnjaković: Nauka o toplini, drugi dio, Tehnička knjiga, Zagreb, 1976.