

Ispitivanje karakteristika termostatirane uljne kupke

Nola, Fran

Undergraduate thesis / Završni rad

2025

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:235:887037>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-12**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Fran Nola

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Danijel Šestan, dipl. ing.

Student:

Fran Nola

Zagreb, 2025

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

Zahvaljujem svome mentoru, izv. prof. dr. sc. Danijelu Šestanu, na pruženoj pomoći tijekom mjernih ispitivanja i izrade ovog rada.

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

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

Fran Nola



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 25 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 25 –	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Fran Nola**

JMBAG: **0035235880**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje karakteristika termostatirane uljne kupke**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Characterization of thermostated oil bath**

Opis zadatka:

Potrebno je definirati i provesti postupak ispitivanja karakteristika termostatirane uljne kupke Kambič OB-50. Kupka se koristi u Laboratoriju za procesna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje (FSB LPM) kao zona kontrolirane temperature u čijem su radnom volumenu smješteni etalonski otpornici. Kao radni medij kupke koristi se ulje, a otpornici se održavaju na konstantnoj temperaturi od 23 °C. Ispitivanje će se sastojati od određivanja vremenske stabilnosti temperature i temperaturnih gradijenata u radnom volumenu kupke. Za ispitivanje će se koristiti postojeća oprema u FSB-LPM-u.

U okviru izrade završnog rada potrebno je:

- Dati opis termostatirane 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.
- Prikazati shemu spajanja i dati opis mjernog sustava koji je korišten za predmetno ispitivanje.
- Sastaviti mjernu liniju za ispitivanje koristeći postojeće uređaje i pomoćnu opremu koja je na raspolaganju u FSB-LPM-u.
- Prikazati rezultate ispitivanja kupke.
- Opisati postupak procjene i procijeniti utjecaj karakteristika termometrijske kupke na nesigurnost električnog otpora etalonskih otpornika koji su smješteni u njenom radnom volumenu.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2024.

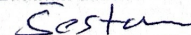
Datum predaje rada:

1. rok: 20. i 21. 2. 2025.
2. rok: 10. i 11. 7. 2025.
3. rok: 18. i 19. 9. 2025.

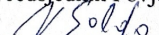
Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24. 2. – 28. 2. 2025.
2. rok: 15. 7. – 18. 7. 2025.
3. rok: 22. 9. – 26. 9. 2025.

Zadatak zadao:


Doc. dr. sc. Danijel Šestan

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

SADRŽAJ	1
POPIS SLIKA	3
POPIS TABLICA	4
POPIS OZNAKA	5
SAŽETAK	6
SUMMARY	7
1. UVOD	7
2. TERMOSTATIRANA KUPKA	8
2.1. Temperaturni gradijenti	9
3. ZONA MJERENJA	10
3.1. Pozicije mjernih mjesta	12
3.2. Određivanje radijalnih temperaturnih gradijenata	15
3.3. Određivanje aksijalnih temperaturnih gradijenata	18
3.4. Temperaturna stabilnost	20
5.6. Ukupni doprinos mjernoj nesigurnosti	21
4. OPIS MJERNOG SUSTAVA	22
4.1. Termostatirana uljna kupka Kambič OB-50	23
4.2. Osjetnici temperature	26
4.3. Instrumenti za mjerenje električnog otpora osjetnika temperature	28
4.3.1 Termometrijski otpornički most ASL F700	29
4.3.2 Multipleksor ASL 158	31
4.3.3 Upravljačka jedinica multipleksora, ASL 148	32
4.3.4 Etalonski otpornik Tinsley 5685A	33
4.4. Računalo i računalni programi	34
4.5. Oprema za praćenje uvjeta okoline	35
5. POSTUPAK ISPITIVANJA	36
5.1. Uvjeti okoliša	36
6. REZULTATI ISPITIVANJA	38

6.1.	Radijalni temperaturni gradijenti na ispitnoj temperaturi od 23°C.....	38
6.2.	Aksijalni temperaturni gradijenti na ispitnoj temperaturi od 23°C.....	39
6.3.	Stalnost temperature	40
6.4.	Ukupna mjerna nesigurnost.....	41
6.5.	Zaključci iz dobivenih rezultata.....	42
7.	UTJECAJ TERMOMETRIJSKE KUPKE NA NESIGURNOST ELEKTRIČNIH OTPORA ETALONSKIH OTPORNIKA	43
	LITERATURA.....	45

POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz temperaturnih gradijenata.....	9
Slika 2. Stalak	10
Slika 3. Hvataljka za termometre	10
Slika 4. Raspored termometara i stalka u termostatiranoj kupki	11
Slika 5. Horizontalni raspored mjernih pozicija	12
Slika 6. Vertikalni raspored mjernih pozicija	13
Slika 7. Oznake visina na stalku za praćenje dubina uranjanja	14
Slika 8. Prikaz promjene pozicije termometra	15
Slika 9. Laboratorijski postav za ispitivanje.....	22
Slika 10. Kupka Kambič OB - 50	23
Slika 11. Glavni dijelovi kupke	25
Slika 12. Otpornički osjetnici temperature	27
Slika 13. Osjetnik platinskog otporničkog termometra	27
Slika 14. Instrumenti za mjerenje električnog otpora osjetnika temperature	28
Slika 15. Termometrijski otpornički most ASL F700	29
Slika 16. Multipleksor	31
Slika 17. Upravljačka jedinica multipleksora	32
Slika 18. Grijano kućište etalonskog otpornika.....	33
Slika 19. Etalonski otpornik	33
Slika 20. Sučelje računalnog programa "LPM Bridges Logger"	34
Slika 21. Specifikacije - Testo 176P1.....	35
Slika 22. Uređaj za praćenje uvjeta okoline Testo 176P1	35

POPIS TABLICA

Tablica 1. Tehnički podaci za kupku	24
Tablica 2. Tehnički podaci otporničkih termometara	26
Tablica 3. Tehnički podaci termometrijskog otporničkog mosta.....	30
Tablica 4. Tehničke specifikacije multipleksora	31
Tablica 5. Eksperimentalno određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 23 °C	38
Tablica 6. Matematički određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 23 °C	38
Tablica 7. Najveći radijalni gradijent na ispitnoj temperaturi 23 °C	38
Tablica 8. Eksperimentalno određeni aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 23 °C	39
Tablica 9. Matematički određeni aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 23 °C	39
Tablica 10. Standardna mjerna nesigurnost zbog aksijalnih gradijenata	39
Tablica 11. Standardna mjerna nesigurnost zbog nestabilnosti temperature.....	40
Tablica 12. Ukupna (kombinirana) standardna mjerna nesigurnost zbog nesavršenosti kupke	41
Tablica 13. Tehnički podaci o etalonskim otpornicima	43

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
<i>T</i>	°C	Temperatura
<i>R</i>	Ω	Električni otpor
<i>u</i>	mK	Mjerna nesigurnost
<i>TC</i>	ppm/°C	Temperaturni koeficijent otpora
<i>P1,P2,P3,P4,P5</i>	-	Mjerne pozicije u kupki
<i>h1,h2,h3</i>	mm	Visine mjernih pozicija
<i>TEPOT21,TEPOT22</i>	-	Oznake otporničkih termometara

SAŽETAK

Tema završnog rada je ispitivanje karakteristika termostatirane uljne kupke. Kupka se koristi kao zona kontrolirane temperature u čijem su radnom volumenu smješteni etalonski otpornici. U radu će se dati opis termostatirane kupke i njenih elemenata, uz postupak ispitivanja zone kontrolirane temperature koji uključuje određivanje horizontalnih i vertikalnih temperaturnih gradijenata te stabilnosti temperature u radnom volumenu kupke.

U radu je opisana i objašnjena korištena metoda ispitivanja uz prikaz pripadajućih shema, parametara i formula.

Na kraju rada, pokazan je postupak procjene utjecaja karakteristika termostatirane kupke na nesigurnost električnog otpora etalonskih otpornika koji su smješteni u njenom radnom volumenu. Ispitivanje karakteristika kupke i pripadna analiza rezultata rađena je prema proceduri Laboratorija za procesna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Ključne riječi: termostatirana kupka, temperaturni gradijenti, mjerna nesigurnost

SUMMARY

This final thesis examines the characteristics of a thermostatic oil bath. The bath is used as a controlled temperature zone, within whose working volume reference resistors are placed. The thesis provides a description of the thermostatic bath and its components, along with the procedure for examining the controlled temperature zone, which includes determining horizontal and vertical temperature gradients as well as temperature stability within the bath's working volume. The testing method is described and explained, including accompanying diagrams, parameters, and formulas.

At the end of the thesis, the procedure for assessing the influence of the thermostatic bath's characteristics on the uncertainty of the electrical resistance of standard resistors placed in its working volume is presented. The testing of the bath's characteristics and the associated analysis of the results were conducted according to the procedure of the Laboratory for Process Measurements at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb.

Key words: thermostated bath, temperature gradients, measurement uncertainty

1. UVOD

U sklopu ovog završnog rada provedeno je ispitivanje karakteristika termostatisane uljne kupke Kambič OB-50. Kupka služi kao zona kontrolirane temperature, unutar koje su smješteni etalonski otpornici. Održavanje stabilne temperature od ključne je važnosti za precizna mjerenja električnog otpora otpornika, posebno u laboratorijskim uvjetima, gdje je potrebno svesti temperaturne oscilacije na minimum. Tijekom ispitivanja, temperatura kupke bila je održavana na konstantnih 23 °C, što predstavlja radnu temperaturu otpornika na kojoj su i umjereni.

Primarni cilj ovog ispitivanja bio je analizirati ključne karakteristike kupke, uključujući određivanje horizontalnih i vertikalnih temperaturnih gradijenata te vremensku stabilnost temperature unutar radnog volumena. Ovi parametri značajno utječu na električni otpor etalonskih otpornika. Budući da se etalonski otpornici koriste za najpreciznija mjerenja temperature, karakteristike kupke unutar koje su smješteni također utječu i na nesigurnost mjerenja temperature pomoću etalonskih platinskih otporničkih osjetnika.

Za mjerenje temperature u okviru karakterizacije uljne kupke korištena su dva termometra, strateški postavljena na različite pozicije unutar njenog radnog volumena. Ovakva konfiguracija omogućila je precizno praćenje temperaturnih razlika po visini i širini radnog volumena. Korištenje dvaju termometara osiguralo je dodatnu sigurnost te verifikaciju i usporedbu dobivenih rezultata.

Osim same stabilnosti temperature, istraživanje je ukazalo na važnost pravilnog održavanja kupke i redovitih ispitivanja. Dobiveni rezultati pružaju osnovu za utvrđivanje prihvatljivosti predmetne kupke za održavanje temperature etalonskih otpornika, koji se u laboratoriju koriste kao referentni otpornici prilikom najpreciznijih mjerenja temperature platinskim otporničkim osjetnicima.

2. TERMOSTATIRANA KUPKA

Termostatirane kupke su uređaji dizajnirani za održavanje preciznih i stabilnih temperaturnih uvjeta unutar radnog volumena. Primarna funkcija ovih uređaja je umjeravanje termometara, no njihova upotreba nije ograničena samo na tu svrhu. Termostatirane kupke često se koriste i za održavanje konstantne temperature etalonskih otpornika. Stabilna temperatura ključna je za minimiziranje promjena električnog otpora otpornika, osobito u preciznim laboratorijskim uvjetima.

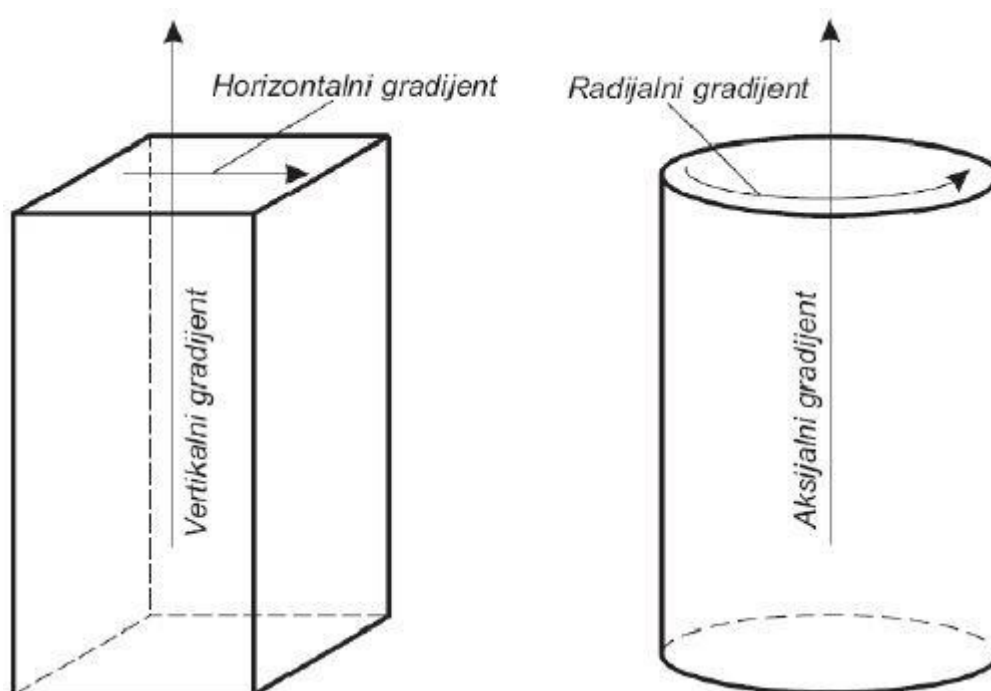
Tijekom ovog istraživanja, uljna kupka Kambič OB-50 korištena je za održavanje temperature od 23 °C. Radna tvar, u ovom slučaju ulje, omogućila je ravnomjeren prijenos topline i osigurala ujednačenost temperature unutar radnog volumena. Osim toga, česta je upotreba izotermalnih blokova smješteni unutar kupke koji omogućuju stabilnost temperature zahvaljujući visokoj toplinskoj inerciji materijala, no u ovom radu je kupka korištena bez izotermalnog bloka.

Homogenost temperature u radnom volumenu kupke ovisi o konstrukcijskim i operativnim čimbenicima, uključujući veličinu kupke, izolaciju, raspored grijača te način cirkulacije radnog medija. Temperaturni gradijenti, koji se analiziraju u aksijalnom i radijalnom smjeru, ključni su za razumijevanje stvarne učinkovitosti kupke u specifičnim radnim uvjetima.

Ovakve periodičke karakterizacije zona kontroliranih temperatura ne samo da omogućuju razumijevanje tehničkih performansi, već i osiguravaju pouzdanost uređaja u specifičnim primjenama.

2.1. Temperaturni gradijenti

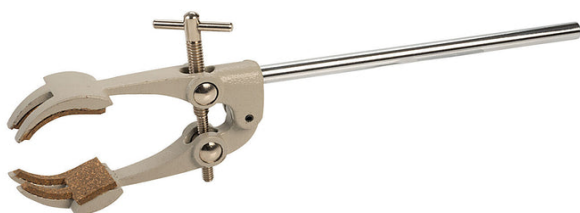
Temperaturni gradijent predstavlja promjenu temperature u smjeru normale na izotermnu plohu. To je vektor okomit na izotermnu plohu, s pozitivnim predznakom u smjeru povećanja temperature. Razlikujemo horizontalne i vertikalne temperaturne gradijente, a u slučaju cilindričnih oblika govorimo o radijalnim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



Slika 1. Prikaz temperaturnih gradijenata

3. ZONA MJERENJA

Prostor unutar termostatisrane uljne kupke Kambič OB-50 definiran je kao zona mjerenja u kojoj su smješteni etalonski otpornici te su unutar te zone provođena ispitivanja temperaturnih gradijenata. Kupka je bila napunjena uljem, koje omogućuje brži prijenos topline u usporedbi s drugim medijima, a termometri su pomoću stalka i hvataljki premješteni na različite pozicije unutar kupke. Ovim postupkom omogućeno je precizno mjerenje temperaturnih gradijenata u horizontalnom i vertikalnom smjeru.



Slika 3. Hvataljka za termometre



Slika 2. Stalak

Mjerenja su uključivala referentni termometar, koji je služio za usporedbu, te drugi termometar koji je postavljan na različite pozicije oko etalonskih otpornika. Otpornici su bili uronjeni u ulje, a premještanjem termometara po visini i širini kupke dobiveni su podaci o temperaturnim razlikama unutar radnog volumena.

Zona umjeravanja unutar kupke uključivala je područje oko otpornika, dok su pozicije mjernog termometra definirane prema sljedećim parametrima:

Horizontalni raspored: Mjerenja su provedena na središtu, lijevoj i desnoj strani kupke u razini otpornika.

Vertikalni raspored: Mjerenja su obuhvatila tri različite visine – blizu podnožja etalonskih otpornika, na sredini visine otpornika i blizu površine ulja.

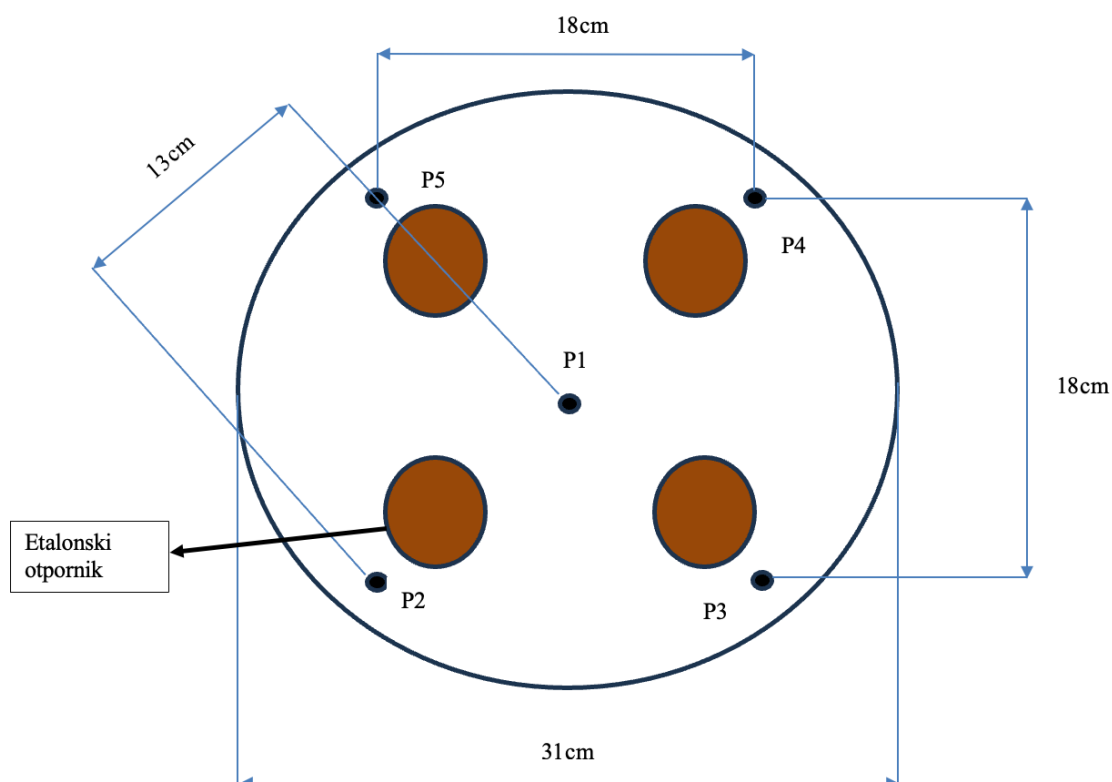
Posebna pažnja posvećena je sljedećim parametrima:

- a) **Raspored otpornika i termometara u kupki** – kako bi se osigurala pravilna cirkulacija ulja oko mjernih elemenata.
- b) **Dubina uranjanja termometara i otpornika** – kako bi se izbjegli toplinski gubici na granicama ulja i zraka i smanjio utjecaj provođenja topline kroz tijela termometara.
- c) **Udaljenost od stijenki kupke** – kako bi se smanjio utjecaj eventualnih temperaturnih fluktuacija uzrokovanih grijačima ili cirkulacijom ulja.



Slika 4. Raspored termometara i stalka u termostatiranoj kupki

3.1. Pozicije mjernih mjesta



Slika 5. Horizontalni raspored mjernih pozicija

Središnja pozicija (**P1**): Termometar je postavljen u sam centar između četiri etalonska otpornika. Ova pozicija omogućuje mjerenje referentne temperature koja je u ravnoteži s uljnim okruženjem.

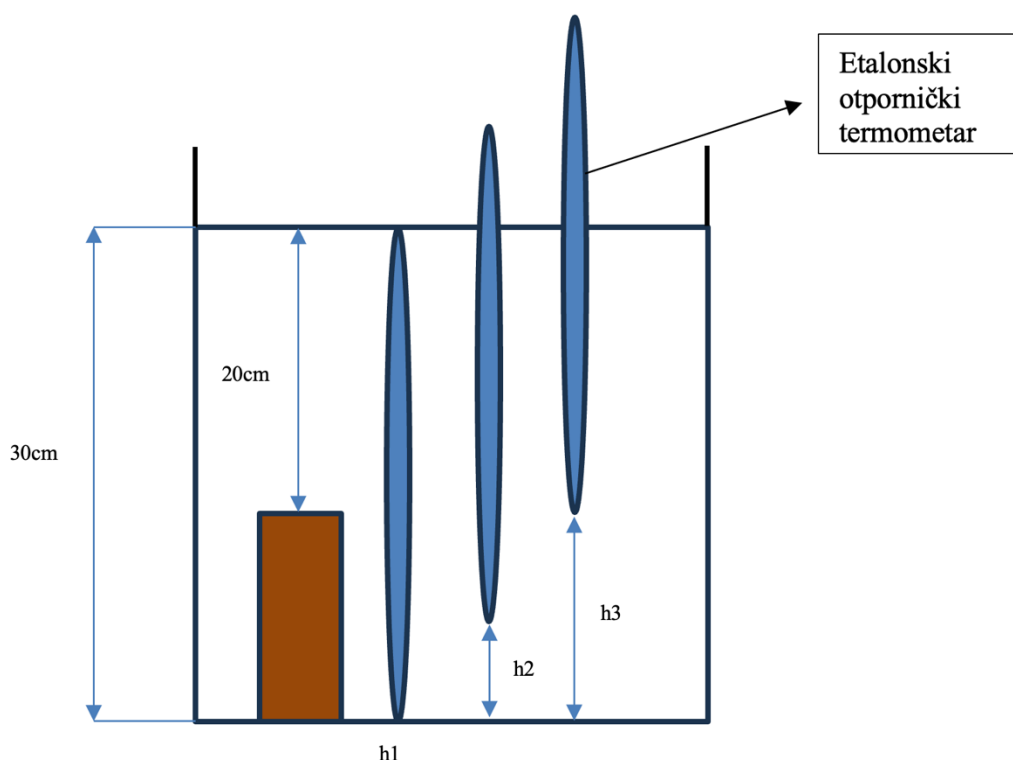
Pozicije uz otpornike (**P2, P3, P4, P5**): Četiri pozicije nalaze se pored svakog etalonskog otpornika:

P5: Pored prvog otpornika (gore lijevo u shemi).

P4: Pored drugog otpornika (gore desno u shemi).

P2: Pored trećeg otpornika (dolje lijevo u shemi).

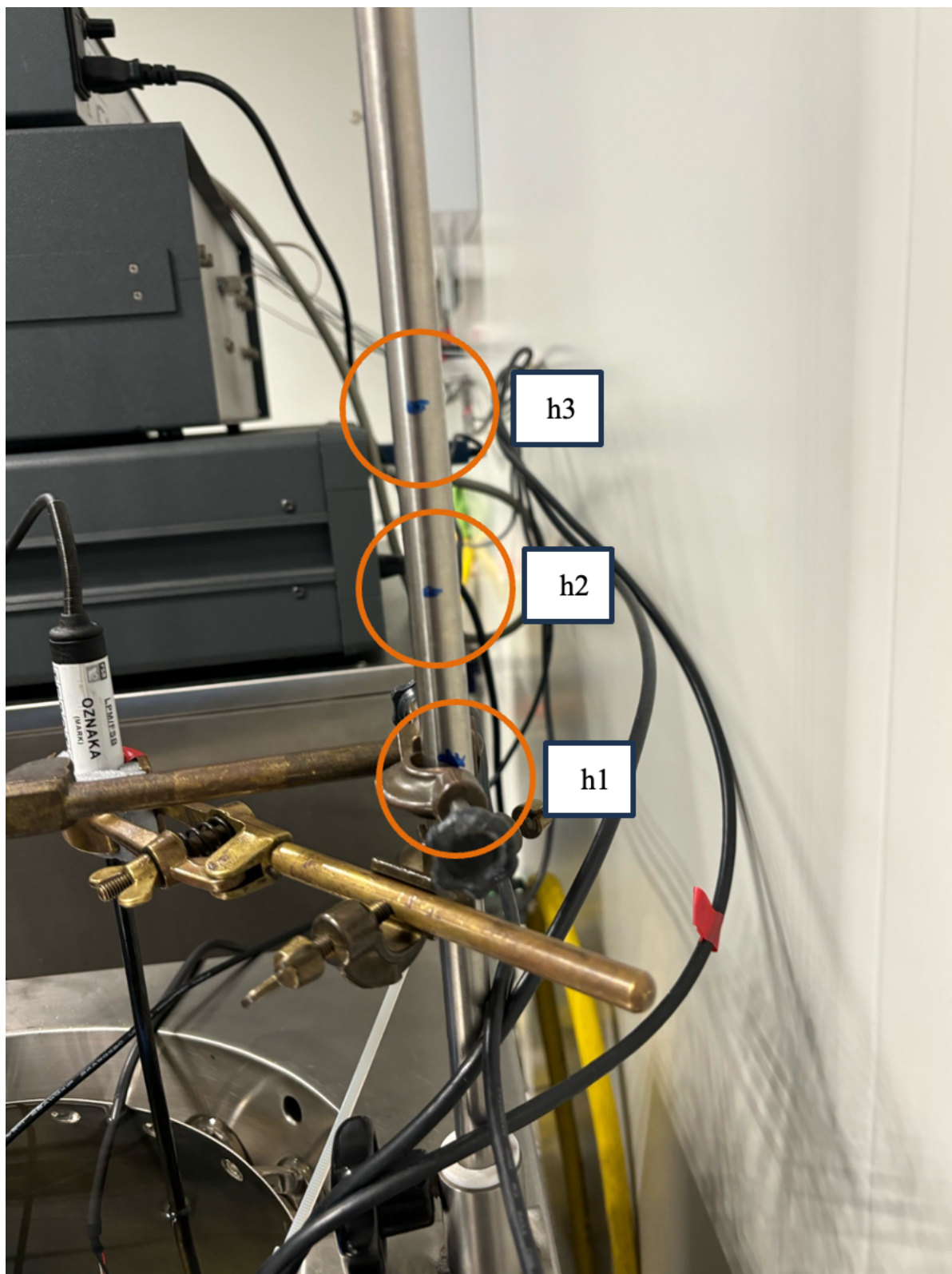
P3: Pored četvrtog otpornika (dolje desno u shemi).



Slika 6. Vertikalni raspored mjernih pozicija

- h1** - Blizu podnožja etalonskih otpornika: Pozicije termometara bile su što bliže poroznoj rešetci na kojoj su postavljeni etalonski otpornici, ali bez dodirivanja njene površine. Visina $h_1=0$ mm označava poziciju u razini dna otpornika.
- h2** - Srednja visina: Termometri su postavljeni u visinu koja odgovara središtu uronjenih etalonskih otpornika. Visina $h_2= 50$ mm, odgovara srednjoj visini etalonskih otpornika.
- h3** - Blizu površine ulja: Pozicije su bile smještene neposredno ispod granice između ulja i zraka. Visina $h_3=100$ mm, označava poziciju neposredno ispod površine ulja.

Svi termometri su bili postavljeni na stalku, a na stalku su bile označene željene dubine uranjanja, kao što je prikazano na priloženoj slici (7) .



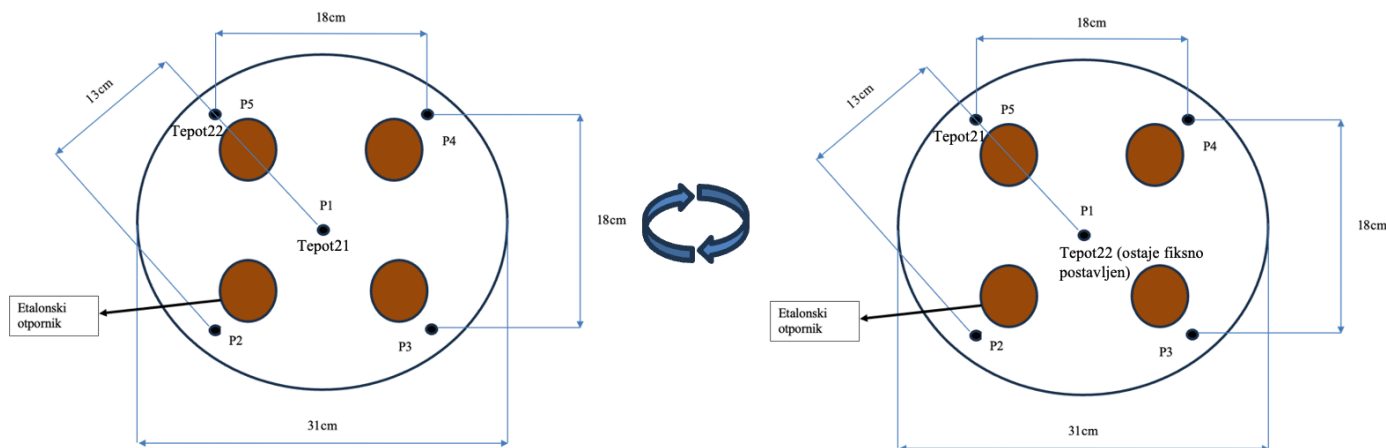
Slika 7. Oznake visina na stalku za praćenje dubina uranjanja

3.2. Određivanje radijalnih temperaturnih gradijenata

Za eksperimentalno određivanje radijalnih gradijenata temperature korištena su dva identična temperaturna osjetnika (isti proizvođač i model). Jedan osjetnik bio je postavljen na referentnu poziciju (PR), dok je drugi premještan između različitih mjernih pozicija (PX), prikazanih na skici tlocrtne raspodjele provrta.

Kako bi se smanjila pogreška u određivanju radijalnih temperaturnih gradijenata, uzrokovana mogućim odstupanjima između osjetnika temperature zbog mjerne nesigurnosti njihovog umjeravanja te vremenskih promjena njihovih karakteristika, korištena je metoda zamjene pozicija termometara, opisana u literaturi [1]. Prije samog određivanja radijalnih gradijenata, bilo je nužno izmjeriti i usporediti očitavanja termometara kada su njihovi osjetnici postavljeni na istu temperaturu. Ovaj postupak omogućava ne samo korekciju odstupanja između osjetnika već i preciznije određivanje temperaturnih razlika između različitih pozicija.

Eksperimentalni postupak započeo je postavljanjem jednog termometra (TEPOT21) na referentnu poziciju P1, dok je drugi termometar (TEPOT22) bio smješten na mjernu poziciju P5 te sve na istoj visini $h=0$. Nakon početnog očitavanja i 30-minutnog perioda sa stabilnom temperaturom, osjetnici su zamijenili pozicije – TEPOT21 je premješten na P5, a TEPOT22 na P1. Očitavanja termometra TEPOT21 na poziciji P1 mogu se opisati kao temperatura radnog medija na toj poziciji (ϑ_1), uvećana za njegovu vlastitu pogrešku (Δ_1). Na isti način, očitavanja termometra TEPOT22 na poziciji P5 predstavljaju temperaturu radnog medija na P5 (ϑ_2), uvećanu za njegovu pogrešku (Δ_2). U daljnjim mjerenjima jedan termometar ostaje u referentnom provrtu, dok se drugi postupno premješta kroz preostale mjerne pozicije. Nakon svake promjene provrta osigurano je dovoljno vrijeme za stabilizaciju temperature (5 minuta).



Slika 8. Prikaz promjene pozicije termometra

Matematički zapis:

$$\text{očitanjeTEPOT21} = \vartheta_1 + \Delta_1$$

$$\text{očitanjeTEPOT22} = \vartheta_5 + \Delta_2$$

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

$$\text{očitanjeTEPOT21} = \vartheta_5 + \Delta_1$$

$$\text{očitanjeTEPOT22} = \vartheta_1 + \Delta_2$$

Kombiniranjem gornjih izraza, pod opravdanim pretpostavkama da se temperature radnog medija na pozicijama P1 i P5 tijekom zamjene nisu mijenjale kao što se nisu mijenjale niti pogreške termometara, moguće je izvesti izraz za izračunavanje razlike temperatura radnog medija na pozicijama P1 i P5:

$$\Delta\vartheta_{P5} = \vartheta_5 - \vartheta_1 = \frac{(\vartheta_5 + \Delta_2) - (\vartheta_1 + \Delta_1) + (\vartheta_5 + \Delta_1) - (\vartheta_1 + \Delta_2)}{2}$$

kao i izraz za izračunavanje međusobnog odstupanja termometara:

$$\Delta_2 - \Delta_1 = \frac{(\vartheta_5 + \Delta_2) - (\vartheta_5 + \Delta_1) + (\vartheta_1 + \Delta_2) - (\vartheta_1 + \Delta_1)}{2}$$

Sve daljnje promjene radijalnih pozicija osjetnika TEPOT21 provodile su se bez zamjene, odnosno, položaj osjetnika TEPOT22 se nakon prve zamjene više nije mijenjao. Pritom se preostali radijalni gradijenti izračunavaju upotrebom jednadžbi:

$$\Delta\vartheta_{P3} = \vartheta_3 - \vartheta_1 = (\vartheta_3 + \Delta_1) - (\vartheta_1 + \Delta_2) + (\Delta_2 - \Delta_1)$$

$$\Delta\vartheta_{P4} = \vartheta_4 - \vartheta_1 = (\vartheta_4 + \Delta_1) - (\vartheta_1 + \Delta_2) + (\Delta_2 - \Delta_1)$$

$$\Delta\vartheta_{P2} = \vartheta_2 - \vartheta_1 = (\vartheta_2 + \Delta_1) - (\vartheta_1 + \Delta_2) + (\Delta_2 - \Delta_1)$$

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

$$\Delta\vartheta_P = | \max \Delta\vartheta_{Px} |, \quad x = 2, 3, 4, 5$$

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

$$a_{PG} = \Delta\vartheta_P$$

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

$$u_{PG} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times a_{PG}$$

U prvom mjerenju gdje smo tražili temperaturnu stabilnost u periodu od 30 minuta, imali smo 49 očitavanja temperature, a sva ostala očitavanja su zahtijevala 5-minutnu stabilnost gdje smo imali 4 mjerenja temperature s po 10 očitavanja. Temperatura na određenoj poziciji dobivena je tako da smo uzeli srednju vrijednost ovih očitavanja.

3.3. Određivanje aksijalnih temperaturnih gradijenata

Kao i za određivanje radijalnih temperaturnih gradijenata, za aksijalne gradijente se također koriste najmanje dva termometra. Pritom je TEPOT21 postavljen na poziciju P5, a TEPOT22 na poziciju P1. Mjerenje započinje s oba osjetnika postavljena na dno ispitivanog dijela radnog volumena kupke (u ravnini s dnom etalonskih otpornika), nakon čega se osjetnik na poziciji P1 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 100 mm. Karakterizacija je provedena pomicanjem osjetnika temperature 2 puta u koracima od 50 mm, znači mjerenja temperature su provedena na visinama 0 mm, 50 mm i 100 mm. Podaci su zabilježeni po stabilizacije temperature nakon premještanja termometra. Nakon stabilizacije temperature, za svaki korak je zabilježeno 10 temperaturnih očitavanja u vremenskom intervalu od 5 minuta. Temperatura na određenoj poziciji dobivena je tako da smo uzeli srednju vrijednost ovih 10 očitavanja.

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

Za visinu $h_1 = 0$ mm:

$$\Delta\vartheta_{A1} = \vartheta_{h1} - \vartheta_{P5} = (\vartheta_{h1} + \Delta 2) - (\vartheta_{P5} + \Delta 1) + (-\Delta 2 + \Delta 1)$$

Za visinu $h_2 = 50$ mm:

$$\Delta\vartheta_{A2} = \vartheta_{h2} - \vartheta_{P5} = (\vartheta_{h2} + \Delta 2) - (\vartheta_{P5} + \Delta 1) + (-\Delta 2 + \Delta 1)$$

Za visinu $h_3 = 100$ mm:

$$\Delta\vartheta_{A3} = \vartheta_{h3} - \vartheta_{P5} = (\vartheta_{h3} + \Delta 2) - (\vartheta_{P5} + \Delta 1) + (-\Delta 2 + \Delta 1)$$

$$\Delta\vartheta_{A2-1} = \Delta\vartheta_{A2} - \Delta\vartheta_{A1}$$

$$\Delta\vartheta_{A3-1} = \Delta\vartheta_{A3} - \Delta\vartheta_{A1}$$

$$\Delta\vartheta_{A3-2} = \Delta\vartheta_{A3} - \Delta\vartheta_{A2}$$

$\Delta\vartheta_{AY}$ - razlika temperatura između pozicija $P_1 - h_y$ i P_5 (oznaka h se odnosi na vertikalni položaj osjetnika temperature)

ϑ_{h_y} - temperatura na poziciji $P_1 - h_y$

ϑ_{P_5} - temperatura na referentnoj poziciji P_5 na visini $h = 0\text{mm}$

ϑ_{Ax-y} - 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 razlike odstupanja ($\Delta 2 - \Delta 1$) poništavaju kod oduzimanja bilo kojih dvaju izraza za $\Delta\vartheta_{AY}$.

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

$$\Delta\vartheta_A = | \max \Delta\vartheta_{Ax} |, \quad x = 1, 2, 3$$

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

$$a_{AG} = \Delta\vartheta_A$$

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

$$u_{AG} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times a_{AG}$$

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 10 očitavanja temperature u trajanju od 5 minuta. Temperatura na određenoj poziciji izračunata je kao srednja vrijednost ovih 10 očitavanja.

3.4. Temperaturna stabilnost

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

TEPOT21 bio je postavljen na poziciju P1 a TEPOT22 na poziciju P5

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

$$\Delta t_S = | t_{max} - t_{min} |_{30 \text{ min}}$$

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

$$2 \times a_S = \Delta \vartheta_S$$

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

$$u_S = \frac{1}{\sqrt{3}} \times a_S$$

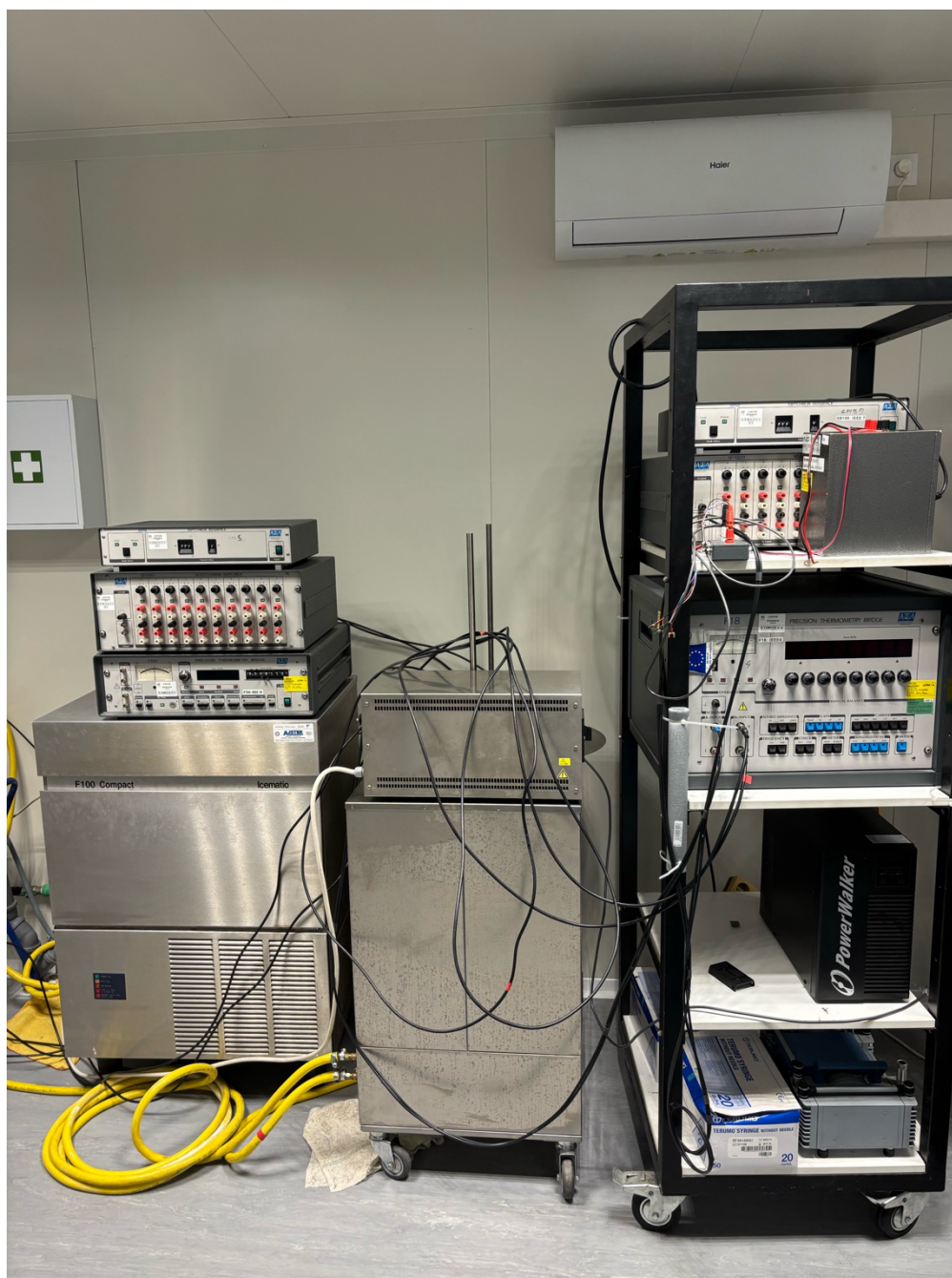
5.6. Ukupni doprinos mjernoj nesigurnosti

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

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

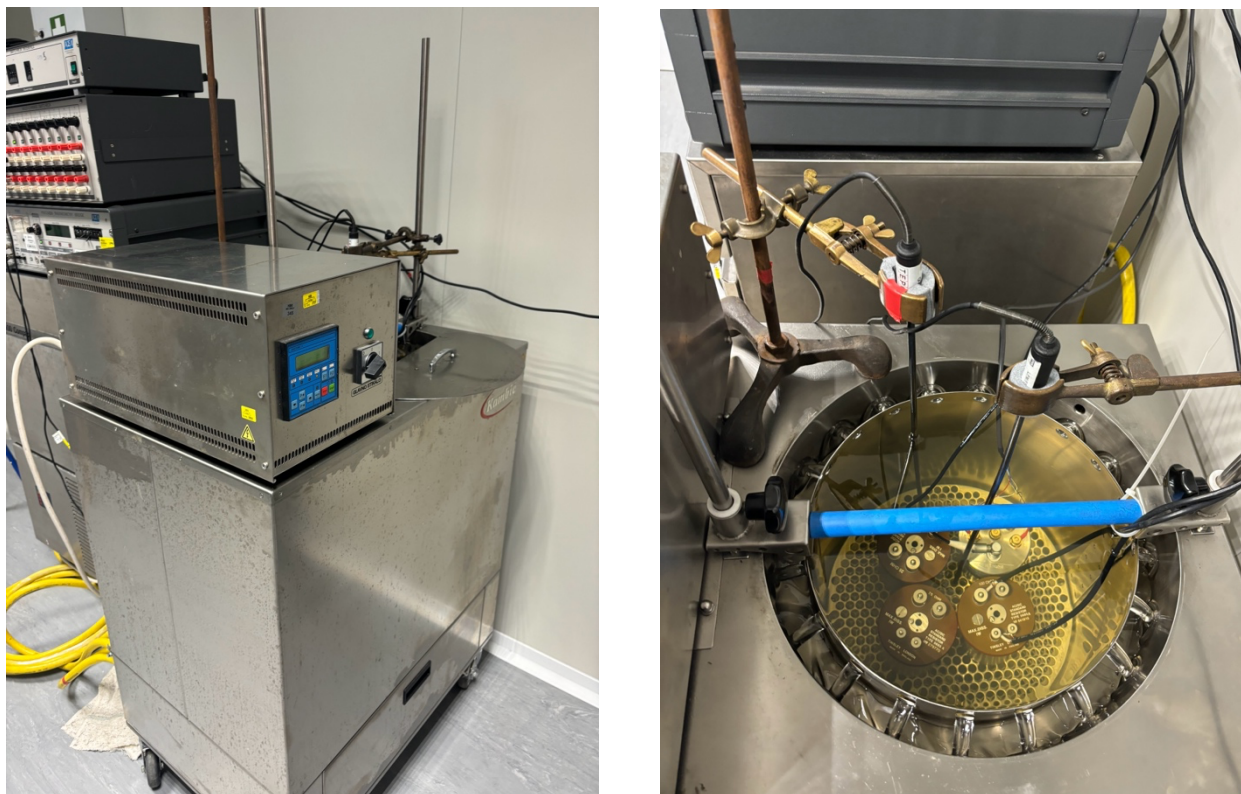
4. OPIS MJERNOG SUSTAVA

Praktični dio završnog rada odrađen je u Laboratoriju za procesna mjerenja u Studentskom inovacijskom centru FSB-a. Na slici 9. je prikaz cjelokupne mjerne linije, a u nastavku slijedi opis opreme korištene prilikom mjerenja.



Slika 9. Laboratorijski postav za ispitivanje

4.1. Termostatorana uljna kupka Kambič OB-50



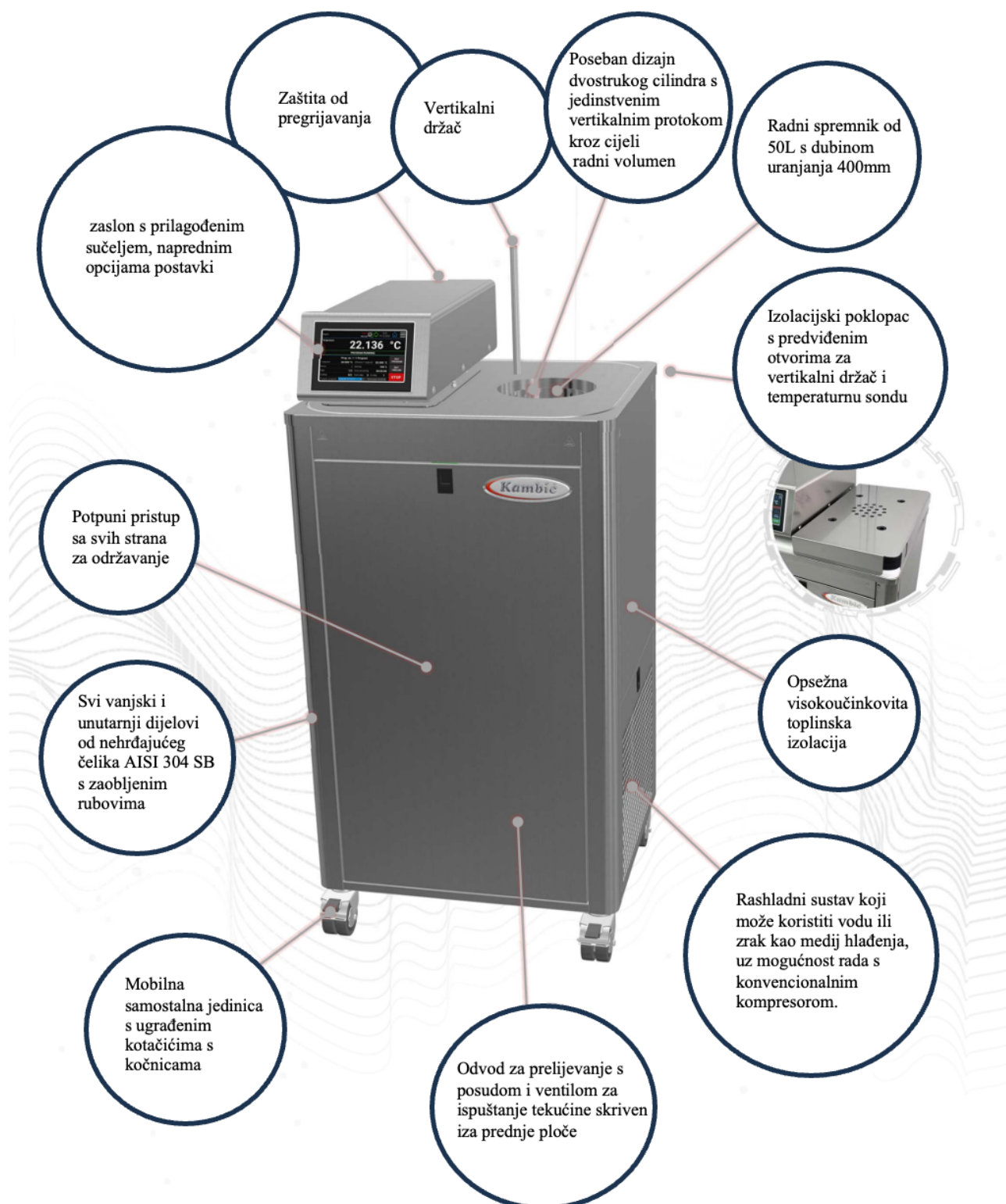
Slika 10. Kupka Kambič OB - 50

Kupka za etalonske otpornike, nabavljena od slovenskog proizvođača „Kambič“, ima radno područje od sobne temperature do 300 °C. Sastoji se od dvije paralelne cijevi – u jednoj su smješteni grijač, izmjenjivač topline hladila i osjetnik regulatora temperature, dok druga cijev predstavlja radni volumen. Unutar prve cijevi nalazi se miješalica koja osigurava turbulentno strujanje, dok mreža na ulazu u radni volumen omogućuje laminarno strujanje radnog fluida. Za održanje temperature od 23 °C koristi se hlađenje protokom male količine vode kroz spiralnu cijev, dok dogrijavanje omogućuju tri skalirana grijača (10 W, 200 W i 2000 W). Zahvaljujući ovoj konstrukciji, postiže se stabilnost i homogena raspodjela temperature unutar medija, što je ključno za minimiziranje temperaturnih utjecaja na otpor etalonskih otpornika i održavanje njihove dugoročne stabilnost.

Kao radni medij koristi se ulje Castrol Optileb AT1.

Tablica 1. Tehnički podaci za kupku

Tehničke specifikacije		
Dimenzije [mm]	Širina	745
	Visina	1450
	Dubina	495
Radno područje [mm]	Promjer	φ320
	Dubina	400
Temperaturni opseg [°C]	15 ...+ 130	
Stabilnost [°C]	+/- 0,003	
Brzina zagrijavanja	~ 0,3 °C/min	
Brzina hlađenja	~ 0,2 °C/min	
Snaga [W]	2500	
Težina [kg]	80	
Volumen fluida [l]	50	



Slika 11. Glavni dijelovi kupke

4.2. Osjetnici temperature

Pri mjerenju temperaturnih gradijenata korišteni su etalonski otpornički osjetnici temperature internih oznaka TEPOT21 i TEPOT22. Ovi osjetnici pripadaju skupini najboljih sekundarnih standardnih interpolacijskih instrumenata za mjerenje temperature te se koriste u temperaturnom području od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $661\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Termometri se izrađuju s osjetnim elementom od visoko čiste platinske žice te se povezuju s termometrijskim otporničkim mostom pomoću četiri žice, čime se postiže najveća moguća preciznost mjerenja. U tijeku proizvodnje, osjetnici se zagrijavaju na visoke temperature i precizno testiraju na stabilnost.

Termometri TEPOT21 i TEPOT22 oblikovani su tako da se mogu umetnuti izravno u radni medij ili u provrt unutar krutog tijela. Prilikom mjerenja temperature u krutom tijelu, razlika između promjera termometra i provrta ne bi trebala biti veća od 0.5 mm kako bi se osigurala točnost mjerenja.

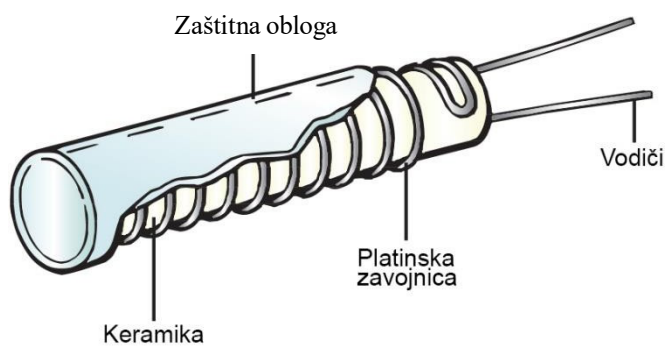
Važno je napomenuti da je termometar TEPOT21 umjeren u nacionalnom umjernom laboratoriju Republike Slovenije, čime je osigurana njegova vrhunska preciznost i sljedivost prema međunarodnim etalonima.

Tablica 2. Tehnički podaci otporničkih termometara

Proizvođač	Fluke/Hart Scientific
Model	5628
Nominalni otpor	$25,5\ \Omega$
Temperaturno područje	$-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $661\text{ }^{\circ}\text{C}$
Nesigurnost	6 mK do 15 mK (u području $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $420\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Dimenzije	$\text{Ø}6.5\text{ mm} \times 510\text{ mm}$



Slika 12. Otpornički osjetnici temperature



Slika 13. Osjetnik platinskog otporničkog termometra

4.3. Instrumenti za mjerenje električnog otpora osjetnika temperature

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

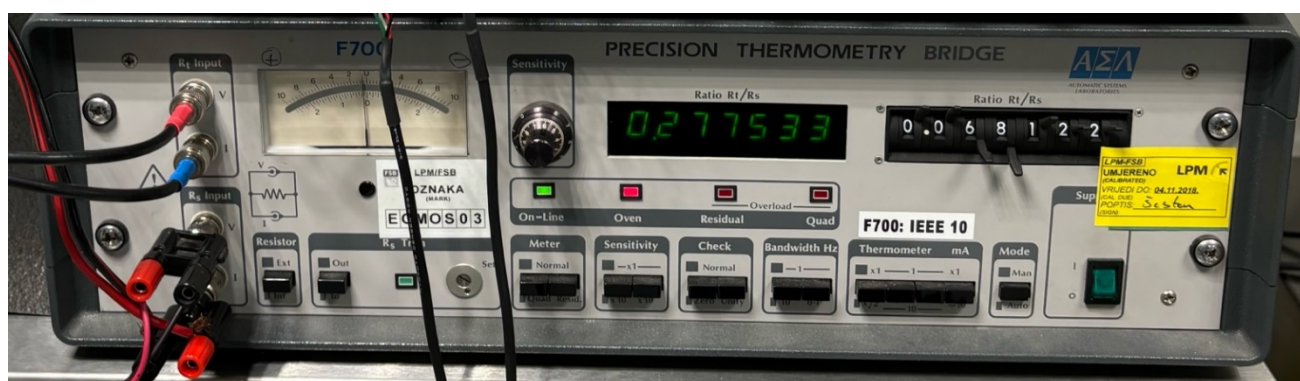
- termometrijski otpornički most ASL F700 (interne oznake EOMOS03/03)
- multipleksor ASL 158 (interne oznake EOMOS03/01)
- upravljačka jedinica multipleksora, ASL 148 (interna oznaka EOMOS03/02)
- etalonski otpornik Tinsley 5685A sa svojim kućištem



Slika 14. Instrumenti za mjerenje električnog otpora osjetnika temperature

4.3.1 Termometrijski otpornički most ASL F700

Za mjerenje otpora platinskih otporničkih termometara korišten je izmjenični otpornički most ASL F700 čiji je proizvođač ASL Limited. Ovaj most ima mogućnost mjeriti električne otpore u rasponu od 0Ω do 400Ω s rezolucijom od 1 ppm dok je u kombinaciji s etalonskim otpornikom nazivnog otpora 100Ω . Most ima jedan ulazni kanal za spajanje platinskih otporničkih osjetnika temperature. U nastavku, tablično su prikazane tehničke karakteristike otporničkog mosta u Tablici 3. kao i njegova fotografija na Slici 15.



Slika 15. Termometrijski otpornički most ASL F700

Tablica 3. Tehnički podaci termometrijskog otporničkog mosta

Proizvođač	ASL	
Model	F700	
Napajanje	240/220/120/100 Vac	
Frekvencija	50 – 60 Hz	
Dimenzije	visina	155 mm
	širina	520 mm
	dužina	466 mm
Masa	15 kg	
Radni uvjeti	0 °C – 30 °C, 10 % - 90 % RH	
Vrijeme balansiranja	20 sekundi za potpuni balans	
Linearnost	< ±1 zadnja decimala (1 ppm)	
Rezolucija	0.255 mK za osjetnik PT100 / 1 mK za osjetnik PT25.5	

4.3.2 Multipleksor ASL 158

Za provedbu karakterizacije kupke korištena su dva osjetnika temperature, koji su s termometrijskim otporničkim mostom povezani preko multipleksora i njegove upravljačke jedinice. Upotrebom multipleksora omogućeno je povezivanje obaju termometara na isti otpornički most. Korišteni multipleksor prikazan je na Slici 16, a njegove su specifikacije navedene u Tablici 4.



Slika 16. Multipleksor

Tablica 4. Tehničke specifikacije multipleksora

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

4.3.3 Upravljačka jedinica multipleksora, ASL 148

Upravljačka jedinica multipleksora (ASL 148) ima ključnu ulogu u sustavu za mjerenje otpora termometara. Njena glavna funkcija je kontrolirati rad multipleksora (ASL 158), koji omogućava povezivanje više termometara na isti otpornički most. Konkretno, uloga upravljačke jedinice uključuje:

Kontrola multipleksora: Upravljačka jedinica omogućava selekciju kanala na multipleksoru, čime omogućava mjerenje otpora različitih termometara jedan po jedan, jer multipleksor ima više kanala za povezivanje termometara.

Povezivanje s računalom: Upravljačka jedinica je povezana s računalom putem GPIB komunikacijskog sučelja, što omogućava prijenos podataka između opreme i računala.

Interakcija sa softverom: Povezuje se s računalom na kojem se koristi program, izrađen u programskom paketu LabView, koji upravlja mjerenjem i očitava podatke s otporničkog mosta. Računalni program šalje naredbe za mjerenje, pohranjuje očitavanja izmjerenih otpora te obrađuje i preračunava očitane otpore u temperaturu.



Slika 17. Upravljačka jedinica multipleksora

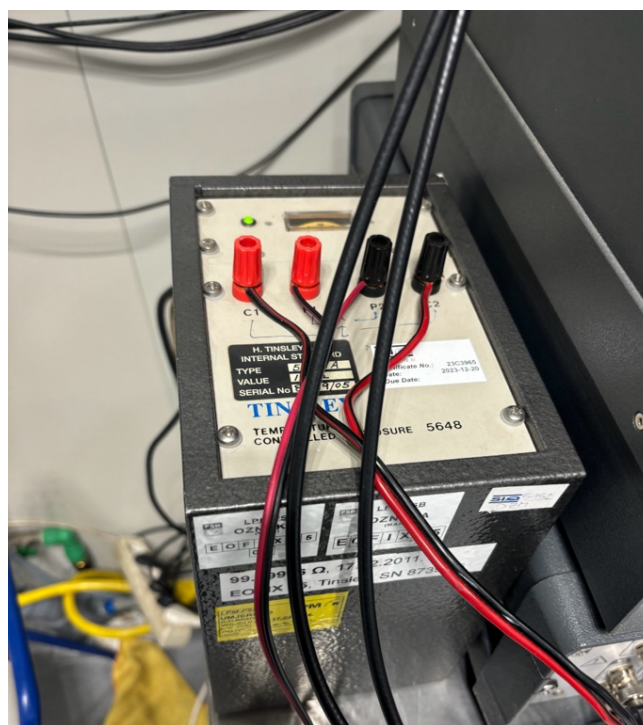
4.3.4 Etalonski otpornik Tinsley 5685A

Etalonski otpornik, poput Tinsley 5685A s nominalnom vrijednošću od $100\ \Omega$, ključna je komponenta u preciznim mjerenjima otpora. Ovi otpornici su često smješteni u termostatisanim kućištima koja održavaju stabilnu temperaturu, čime se minimizira utjecaj temperaturnih varijacija na njihovu vrijednost otpora.

U sustavu za mjerenje otpora platinskih otporničkih termometara, etalonski otpornik je povezan s otporničkim mostom ASL F700 putem četverožilnog spoja, osiguravajući visoku preciznost i stabilnost mjerenja. Ova konfiguracija omogućuje kompenzaciju otpora spojnih vodova, koji se mijenja pod utjecajem vanjskih čimbenika, osiguravajući precizna i pouzdana očitavanja temperature.



Slika 19. Etalonski otpornik

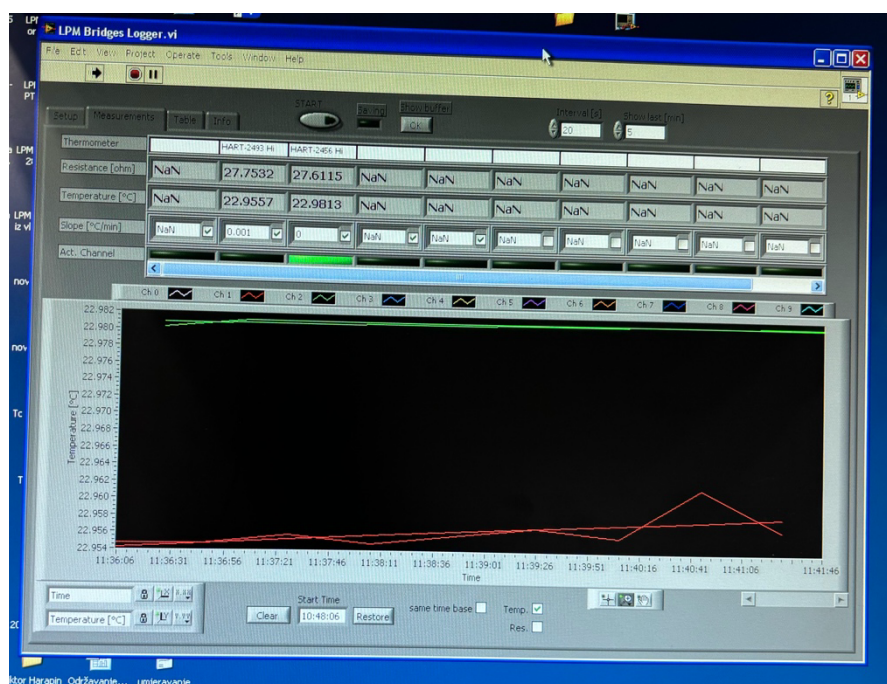


Slika 18. Grijano kućište etalonskog otpornika

4.4 Računalo i računalni programi

Program „LPM Bridges Logger“, koji su zaposlenici laboratorija izradili u sučelju „LabView“, koristi se za prikupljanje i obradu podataka s termometrijskog otporničkog mosta te za upravljanje multipleksorima. Omogućuje grafički i tablični prikaz mjerenih podataka, statističku obradu, podešavanje mosta i konverziju otpora u temperature. Program također omogućuje praćenje podataka u stvarnom vremenu, pohranu rezultata i vizualizaciju u obliku grafova, što olakšava analizu i optimizaciju mjerenja.

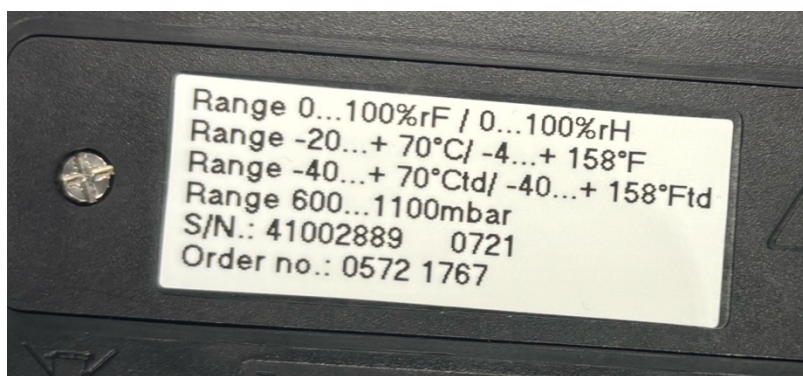
Korisnici mogu konfigurirati parametre za različite osjetnike temperature, a program podržava višekanalna mjerenja, što omogućuje istovremeno praćenje više temperatura. Ovaj sustav je posebno koristan u laboratorijskim uvjetima, gdje je preciznost i fleksibilnost ključna za valjanost eksperimenata.



Slika 20. Sučelje računalnog programa "LPM Bridges Logger"

4.5 Oprema za praćenje uvjeta okoline

Za praćenje uvjeta okoline korišteno je mjerilo Testo 176P1, kojim smo pratili temperaturu, tlak i vlagu u prostoriji. Korišten uređaj je prikazan na slici 22., a njegove specifikacije na slici 21.



Slika 21. Specifikacije - Testo 176P1

Slika 22. Uređaj za praćenje uvjeta okoline Testo 176P1

5. POSTUPAK ISPITIVANJA

Općeniti redosljed 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 (u ovom radu 23°C).
- b) Nakon postizanja željene stacionarne ispitne temperature, određuje se temperaturna homogenost (prostorni gradijenti temperature) i stabilnost, u skladu s postupcima opisanim u poglavlju 3.2.

5.1. 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 22 °C i 24 °C
- Relativna vlažnost zraka između 40 %RH i 48 %RH.

Uvjeti okoliša tijekom mjerenja bilježeni su umjerenim higrotermometrom.

5.2. Priprema mjerenja

Prije početka mjerenja potrebno je osigurati osnovne uvjete kako bi se mjerenje moglo pravilno provesti. U svrhu pripreme za provedbu mjerenja, postupak je sljedeći:

- 1.) Uređaj za praćenje uvjeta okoliša (Testo 176P1) postavljen je u blizini termostatirane kupke kako bi se pratila temperatura, vlaga i tlak u prostoriji. Pričekalo se da se uvjeti stabiliziraju i postignu stacionarno stanje.
- 2.) Prije početka mjerenja, detaljno je pregledana termostatirana kupka Kambič OB-50 kako bi se osiguralo da je u ispravnom stanju za ispitivanje. Ako se tijekom pregleda ustanovi da kupka nije u ispravnom stanju ili da postoji rizik od kvara, ispitivanje se zaustavlja. Također, ako je ugrožena sigurnost mjeritelja (npr. zbog previsoke temperature ili drugih opasnih uvjeta), ispitivanje se odmah prekida.

- 3.) Nakon što su uvjeti okoliša stabilni i kupka je pregledana, određuju se temperaturne točke ispitivanja. U ovom slučaju, temperatura je postavljena na 23 °C. Zatim se određuje prostorni razmještaj mjernih točaka unutar kupke, uključujući horizontalne i vertikalne pozicije termometara kako bi se osigurala precizna mjerenja temperaturnih gradijenata.

- 4.) Na kraju pripremnih aktivnosti, priprema se oprema koja uključuje postavljanje termometara na odgovarajuće pozicije unutar kupke, povezivanje s otporničkim mostom ASL F700 te provjeru funkcionalnosti cijelog mjernog sustava.

6. REZULTATI ISPITIVANJA

6.1. Radijalni temperaturni gradijenti na ispitnoj temperaturi od 23°C

Tablica 5. Eksperimentalno određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 23 °C

Očitavanja $T_2, ^\circ\text{C}$ $TEPOT_{22}$	Očitavanja $T_1, ^\circ\text{C}$ $TEPOT_{21}$					Radijalni gradijenti, (mK)
	$P_1 (P_R)$	P_2	P_3	P_4	P_5	
22,9807					22,9556	0,7
22,9813				22,9554		0
22,9799		22,9541				-1,7
22,9813			22,9537			0,1

Tablica 6. Matematički određeni radijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 23 °C

	Radijalni gradijenti, (mK)
P2-P3	1,8
P2-P4	0,1
P2-P5	0,6
P3-P4	1,7
P3-P5	2,3
P4-P5	0,6

Tablica 7. Najveći radijalni gradijent na ispitnoj temperaturi 23 °C

Pozicija	Radijalni gradijent $\Delta\vartheta_P$, mK	Standardna nesigurnost u_{PG} , mK
P3 – P5	2,3	1,4

6.2. Aksijalni temperaturni gradijenti na ispitnoj temperaturi od 23°C

Tablica 8. Eksperimentalno određeni aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 23 °C

Termometar $T_1 - \text{TEPOT}_{21} - P_5 (P_R)$ Termometar $T_2 - \text{TEPOT}_{22} - P1$				
Očitavanja T_1 , °C	Očitavanja T_2 , °C			Aksijalni gradijent, mK
h=0 mm	h1=0 mm	h2=50 mm	h3=100 mm	
22,9556	22,9807			-0,7
22,9557		22,9811		-0,5
22,9562			22,9825	0,5

Tablica 9. Matematički određeni aksijalni gradijenti na ispitnoj temperaturi 23 °C

	Radijalni gradijenti, (mK)
$\Delta\vartheta_{A2-1} = \Delta\vartheta_{A2} - \Delta\vartheta_{A1}$	0,2
$\Delta\vartheta_{A3-1} = \Delta\vartheta_{A3} - \Delta\vartheta_{A1}$	1,1
$\Delta\vartheta_{A3-2} = \Delta\vartheta_{A3} - \Delta\vartheta_{A2}$	1

Tablica 10. Standardna mjerna nesigurnost zbog aksijalnih gradijenata

Ispitna temperatura, °C	Aksijalni gradijent $\Delta\vartheta_A$, mK	Standardna nesigurnost u_{AG} , mK
23	1,1	0,6

6.3. Stalnost temperature

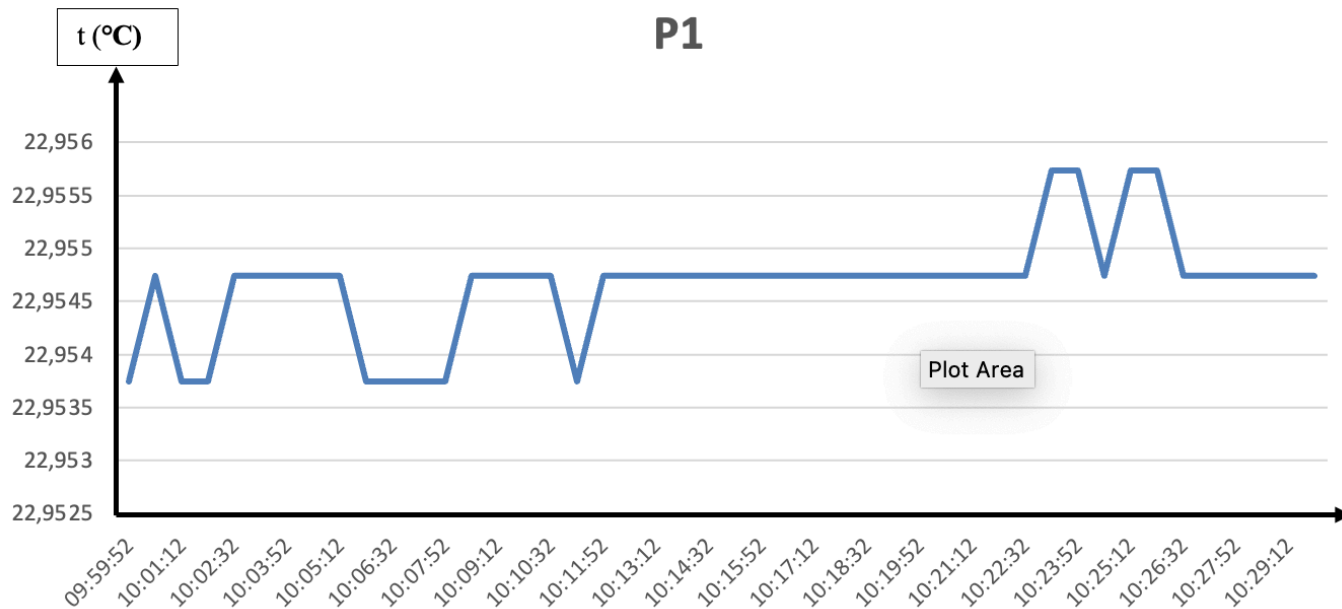
Stabilnost temperature je utvrđena s osjetnikom temperature **TEPOT21** postavljenim na referentnu poziciju P1.

t_{max}	22,9557 °C
t_{min}	22,9537 °C

Tablica 11. Standardna mjerna nesigurnost zbog nestabilnosti temperature

Ispitna temperatura, °C	Poluinterval pravokutne razdiobe a_s , mK	Standardna nesigurnost u_s , mK
23	1	0,6

30-minutna stabilnost temperature u ispitnoj točki



Dijagram 1. 30-minutna stabilnost temperature u ispitnoj točki P1

6.4. Ukupna mjerna nesigurnost

Tablica 12. Ukupna (kombinirana) standardna mjerna nesigurnost zbog nesavršenosti kupke

Temperatura, °C	23
Standardna nesigurnost zbog radijalnih gradijenata u_{PG} ($k=1$), mK	1,4
Standardna nesigurnost zbog aksijalnih gradijenata u_{AG} ($k=1$), mK	0,6
Standardna nesigurnost zbog nestabilnosti temperature u_S ($k=1$), mK	0,6
Ukupna standardna nesigurnost zbog nesavršenosti kupke u ($k=1$), mK	1,6

6.5. Zaključci iz dobivenih rezultata

- 1.) Radijalni temperaturni gradijenti: Mjerenja su pokazala da su radijalni temperaturni gradijenti unutar kupke relativno mali, s maksimalnom razlikom temperature od 2,3 mK između različitih radijalnih pozicija. Standardna nesigurnost zbog radijalnih gradijenata iznosi 1,4 mK, što ukazuje na dobru homogenost temperature u horizontalnom smjeru.
- 2.) Aksijalni temperaturni gradijenti: Analiza aksijalnih gradijenata pokazala je da su temperaturni gradijenti u vertikalnom smjeru još manji, s maksimalnom razlikom temperature od 1,1 mK. Standardna nesigurnost zbog aksijalnih gradijenata iznosi 0,6 mK, što potvrđuje visoku homogenost temperature u vertikalnom smjeru.
- 3.) Temperaturna stabilnost: Ispitivanje stabilnosti temperature tijekom 30-minutnog perioda pokazalo je da su oscilacije temperature bile zadovoljavajuće niske, s maksimalnom razlikom od 2 mK. Standardna nesigurnost zbog nestabilnosti temperature iznosi 0,6 mK, što ukazuje na visoku vremensku stabilnost temperature unutar radnog volumena kupke.
- 4.) Ukupna mjerna nesigurnost: Kombinirana standardna nesigurnost zbog nesavršenosti kupke, uključujući radijalne i aksijalne gradijente te nestabilnost temperature, iznosi 1,6 mK. Ova vrijednost ukazuje na to da kupka Kambič OB-50 pruža visoku razinu stabilnosti i homogenosti temperature.

Zaključno, rezultati ispitivanja potvrđuju da termostatirana uljna kupka Kambič OB-50 zadovoljava zahtjeve za precizno održavanje temperature unutar svog radnog volumena, što je od ključne važnosti za laboratorijska mjerenja u kojima se ova kupka koristi.

7. UTJECAJ TERMOMETRIJSKE KUPKE NA NESIGURNOST ELEKTRIČNIH OTPORA ETALONSKIH OTPORNIKA

U termometrijskoj kupki bili su uronjeni etalonski otpornici marke Tinsley, nominalnih vrijednosti električnih otpora od 25 Ω i 100 Ω. Za proračun su korišteni podaci preuzeti iz tehničkih specifikacija za te otpornike.

Tablica 13. Tehnički podaci o etalonskim otpornicima

Etalonski otpornik, model Tinsley 5685 A	
Vrijednost otpora:	10, 25, 100, 400 i 1.000 Ω
Tolerancija:	±10 ppm
Dugoročna stabilnost:	2 ppm godišnje
Temperaturni koeficijent (TC):	2 ppm/°C
Ovisnost o frekvenciji:	1 ppm do 1.592 Hz
Dopušteni uvjeti okoline:	
Radna temperatura:	23 °C
Dopušteni raspon temperature u radu:	15 °C do 40 °C
Kućište:	
Dimenzije:	Ø = 76 mm, visina 114 mm
Masa:	0.7 kg

Za izračun utjecaja nesigurnosti temperature termometrijske kupke na nesigurnost električnog otpora etalonskih otpornika, koristimo temperaturni koeficijent otpornika (TC) i stabilnost kupke.

Nesigurnost temperature u kupki: 1,6 mK = 0,0016 K

Temperaturni koeficijent otpornika (TC):

Za etalonski otpornik obično oko 2 ppm/°C (prema ranije priloženoj tablici)

Proračun nesigurnosti otpornika zbog nesigurnosti temperature kupke:

$$u_R = TC \times u$$

$$u_R = 2 \times 10^{-6} \text{ ppm/}^\circ\text{C} \times 1,6 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$$

$$u_R = 3,2 \times 10^{-9} = 3,2 \text{ ppb (parts per billion)}$$

To znači da nesigurnost električnog otpora etalonskih otpornika zbog nesigurnosti temperature kupke iznosi 3,2 ppb. Ako radimo s otpornikom od 100 Ω , to daje nesigurnost električnog otpora od:

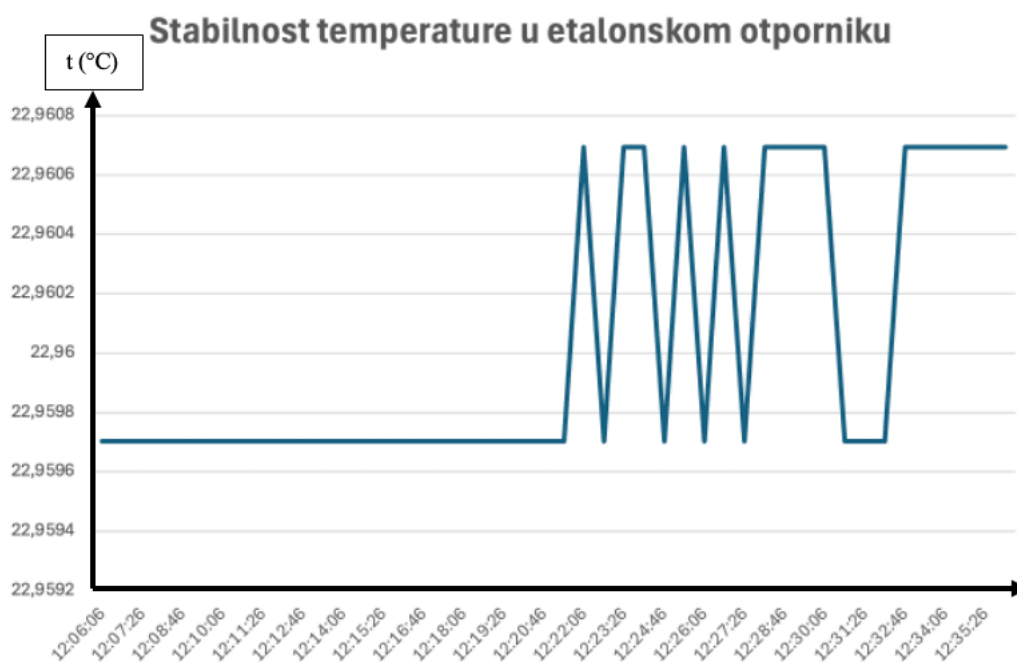
$$u_R = 100 \times 3,2 \times 10^{-9} = 0,32 \mu\Omega$$

Za otpornik od 25 Ω :

$$u_R = 25 \times 3,2 \times 10^{-9} = 0,08 \mu\Omega$$

Zaključak:

Utjecaj nesigurnosti temperature ulja u radnom volumenu termometrijske kupke na nesigurnost električnih otpora etalonskih otpornika je vrlo mali. Za otpornik od 100 Ω , nesigurnost je 0,32 $\mu\Omega$, a za otpornik od 25 Ω , nesigurnost je 0,08 $\mu\Omega$. Ovi rezultati pokazuju da je nesigurnost temperature ulja u kupki dovoljno niska za visokoprecizna mjerenja električnog otpora.



Dijagram 2. Stabilnost temperature u etalonskom otporniku

Iako su oscilacije prisutne, one su minimalne i ne utječu značajno na precizna mjerenja električnog otpora.

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] Josip Aščić: Ispitivanje karakteristika niskotemperaturne kupke, završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2021.
- [5] Ante penava: Ispitivanje karakteristika niskotemperaturne kupke, završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2022.
- [6] Standard reference resistor Model 5685 and 5695,PDF dokument.