

Ispitivanje karakteristika termostatirane uljne kupke

Jukić, Antun

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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:235:040199>

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

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

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Antun Jukić

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

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

Student:

Antun Jukić

Zagreb, 2020.

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

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

Zahvaljujem svojoj obitelji na podršci tijekom cijelog studija.

Antun Jukić



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 / 20 - 6 / 3 | |
| Ur. broj: 15 - 1703 - 20 - | |

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Antun Jukić** Mat. br.: **0035204511**

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

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

Opis zadatka:

Potrebno je definirati postupak ispitivanja karakteristika termostatirane uljne kupke s izotermalnim blokom, u temperaturnom području od 60 °C do 180 °C. Kupka se koristi u Laboratoriju za procesna mjerenja za provođenje usporedbenih umjeravanja termometara. Ispitnim postupkom potrebno je obuhvatiti parametre koji imaju utjecaj na nesigurnost usporedbenog umjeravanja termometara u predmetnoj kupki.

U radu je potrebno:

- Dati opis termostatirane kupke sa skicom radnog prostora 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 izotermalnog bloka uronjenog u radni medij 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 proračunski primjer ispitivanja s određenim doprinosima kupke ukupnoj mjernoj nesigurnosti, kada se ona koristi za umjeravanje termometara.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
15. svibnja 2020.

Datum predaje rada:
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Doc. Dr. sc. Danijel Šestan

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

| | |
|--|-----|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | II |
| POPIS TABLICA..... | III |
| POPIS OZNAKA | IV |
| SAŽETAK..... | V |
| SUMMARY | VI |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. TERMOSTATIRANA KUPKA..... | 2 |
| 2.1. Temperaturni gradijenti..... | 2 |
| 3. ZONA UMJERAVANJA | 4 |
| 3.1. Izotermalni blok | 4 |
| 4. POPIS OPREME | 8 |
| 4.1. Termostatirana kupka Leeds & Northrup | 9 |
| 4.2. Izotermalni blok | 12 |
| 4.3. Termometri..... | 13 |
| 4.4. Oprema za mjerenje otpora termometara | 14 |
| 4.5. Računalo..... | 17 |
| 5. POSTUPAK ISPITIVANJA..... | 18 |
| 5.1. Uvjeti okoliša | 18 |
| 5.2. Priprema mjerenja | 18 |
| 5.3. Temperature ispitivanja..... | 18 |
| 5.4. Određivanje stalnosti temperature | 19 |
| 5.5. Homogenost temperature u radijalnom smjeru | 19 |
| 5.6. Homogenost temperature u aksijalnom smjeru..... | 20 |
| 5.7. Ukupna mjerna nesigurnost u zoni umjeravanja..... | 20 |
| 6. REZULTATI ISPITIVANJA | 22 |
| 6.1. Radijalna homogenost temperature..... | 22 |
| 6.2. Aksijalna homogenost temperature..... | 24 |
| 6.3. Stalnost temperature..... | 26 |
| 7. ZAKLJUČAK..... | 31 |
| LITERATURA..... | 32 |
| PRILOZI..... | 33 |

POPIS SLIKA

| | | |
|-----------|---|----|
| Slika 1. | Prikaz temperaturnih gradijenata..... | 2 |
| Slika 2. | Izotermalni blok | 4 |
| Slika 3. | Prikaz mogućih mjesta ispitivanja..... | 5 |
| Slika 4. | Primjer geometrije bloka | 6 |
| Slika 5. | Mjerna linija | 8 |
| Slika 6. | Termostatirana kupka Leeds & Northrup..... | 9 |
| Slika 7. | Presjek termostatirane kupke Leeds & Northrup | 11 |
| Slika 8. | Položaj provrta na izotermalnom bloku | 12 |
| Slika 9. | Otpornički termometri korišteni za umjeravanje kupke..... | 14 |
| Slika 10. | Termometrijski otpornički most F700..... | 17 |
| Slika 11. | Mjerna nesigurnost zbog radijalne nehomogenosti..... | 24 |
| Slika 12. | Mjerna nesigurnost zbog aksijalne nehomogenosti..... | 26 |
| Slika 13. | 30 minutna stalnost temperature pri 60 °C | 27 |
| Slika 14. | 30 minutna stalnost temperature pri 120 °C | 27 |
| Slika 15. | 30 minutna stalnost temperature pri 170 °C | 28 |
| Slika 16. | Mjerna nesigurnost stalnosti temperature..... | 28 |
| Slika 17. | Ukupna mjerna nesigurnost..... | 30 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Primjer podataka o bloku | 6 |
| Tablica 2. Primjer podataka o provrtima..... | 7 |
| Tablica 3. Tehnički podaci za kupku | 10 |
| Tablica 4. Odabir radnog medija za Leeds & Northrup kupku | 10 |
| Tablica 5. Deklarirana homogenost i stalnost termostatirane kupke Leeds & Northrup | 11 |
| Tablica 6. Podaci o izotermalnom bloku..... | 12 |
| Tablica 7. Podaci o provrtima bloka | 13 |
| Tablica 8. Tehnički podaci otporničkih termometara | 13 |
| Tablica 9. Tehnički podaci multipleksora | 15 |
| Tablica 10. Tehnički podaci upravljačke jedinice multipleksora..... | 15 |
| Tablica 11. Tehnički podaci otporničkog mosta | 16 |
| Tablica 12. Homogenost temperature u radijalnom smjeru za 60 °C – rezultati | 22 |
| Tablica 13. Homogenost temperature u radijalnom smjeru za 120 °C – rezultati | 23 |
| Tablica 14. Homogenost temperature u radijalnom smjeru za 170 °C – rezultati | 23 |
| Tablica 15. Homogenost temperature u aksijalnom smjeru – rezultati..... | 25 |
| Tablica 16. Mjerna nesigurnost stalnosti temperature | 26 |
| Tablica 17. Ukupna mjerna nesigurnost (60 °C)..... | 29 |
| Tablica 18. Ukupna mjerna nesigurnost (120 °C)..... | 29 |
| Tablica 19. Ukupna mjerna nesigurnost (170 °C)..... | 30 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|---------------|--------------------|----------------------------------|
| u | mK | Mjerna nesigurnost |
| R | Ω | Otpor |
| a | mK | Poluinterval pravokutne razdiobe |
| ϑ | $^{\circ}\text{C}$ | Temperatura |
| T | K | Temperatura |
| h | mm | Visina |

SAŽETAK

Ovaj završni rad kao temu ima ispitivanje karakteristika termostatirane uljne kupke. U radu će se dati opis termostatirane kupke i njenih elemenata, uz postupak ispitivanja koji obuhvaća parametre koji imaju utjecaj na nesigurnost usporedbenog umjeravanja termometara, a to su određivanje horizontalnih i vertikalnih gradijenata te stabilnosti temperature. Na kraju rada, pokazan je i proračunski primjer ispitivanja s doprinosima kupke ukupnoj mjernoj nesigurnosti. 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

The topic of this paper is the examination of the characteristics of a thermostatic oil bath. The paper describes the thermostatic bath and its components, together with the test procedure which includes parameters affecting the uncertainty of the comparison calibration of thermometers, namely the determination of horizontal gradients, vertical gradients and temperature stability. At the end of the paper, the example uncertainty budget is shown, giving the contribution of the bath to the total measurement uncertainty when the bath is used for comparison calibration of thermometers. The calculation was made according to the procedure developed by the Laboratory for Process Measurement at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb.

Key words: thermostated bath, temperature gradients, measurement uncertainty

1. UVOD

U ovom završnom radu obrađivat će se postupak ispitivanja karakteristika termostatisane uljne kupke s izotermalnim blokom, u temperaturnom području od 60 °C do 170 °C. Kupka služi za provođenje usporedbenih umjeravanja termometara, a postupak se provodi u svrhu dobivanja potrebnih informacija o kupki u pogledu mjernih nesigurnosti, kada se ona koristi za umjeravanje termometara.

Cilj ispitivanja je određivanje radijalnih i aksijalnih temperaturnih gradijenata kupke, kao i određivanje stabilnosti temperature u radnom volumenu izotermalnog bloka uronjenog u radni medij kupke. Ponekad se, uz navedeno, određuje i dinamika zagrijavanja kao orijentacijski parametar. Ova informacija se kasnije koristi za procjenu mjerne nesigurnosti kupke, te za umjeravanje termometara.

Također, potrebno je naglasiti da ne postoji jedinstvena metoda prihvaćena u svijetu za umjeravanje termometara, tako da laboratoriju moraju provoditi vlastita ispitivanja. Kada bi postojala međunarodno priznata procedura za ispitivanje karakteristika kupke, svi potrebni podaci o vremenskoj stabilnosti temperature i temperaturnim gradientima nalazili bi se u katalozima. Takvo što bi bilo prednost i za kupce, koji bi mogli odabrati proizvode s pouzdanijim karakteristikama.

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

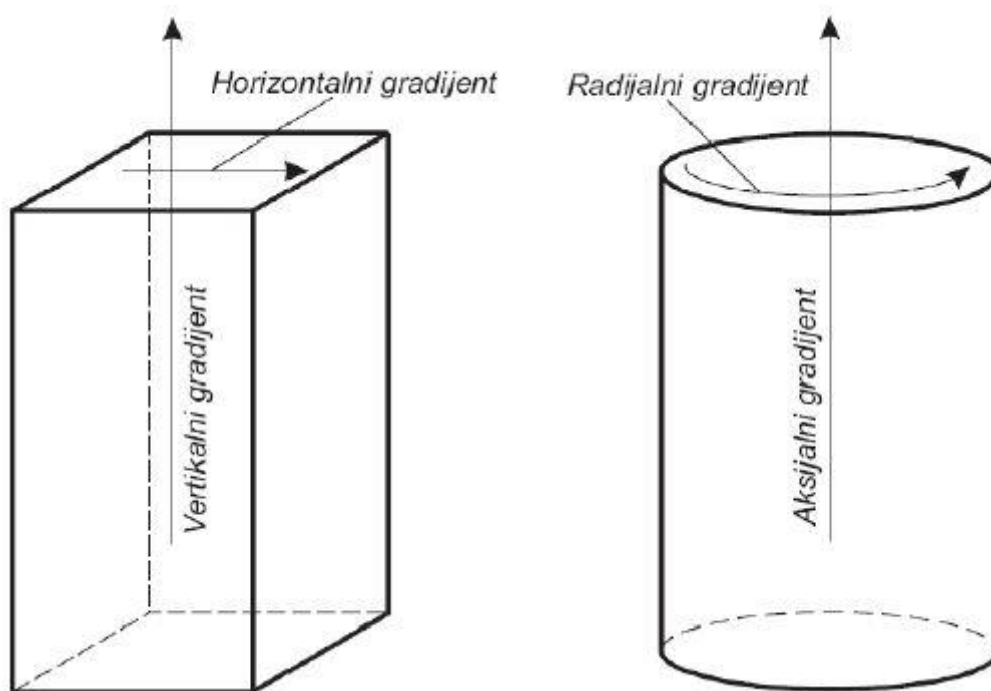
Mjerna linija za ispitivanje sastavljena je korištenjem postojećih uređaja i opreme koja je na raspolaganju u Laboratoriju za Procesna Mjerenja.

2. TERMOSTATIRANA KUPKA

Termostatirana kupka je uređaj opremljen spremnikom, koji omogućuje zadržavanje radne tvari (tekućine) na točno određenoj temperaturi, koristeći kombinaciju sustava grijanja, hlađenja i cirkulacije. Koriste se različite tekućine, npr. alkohol, voda, silikonsko ulje itd. U usporedbi s umjeravanjem zraka, prednost termostatirane kupke je puno brži prijenos topline putem tekućine. Uz to, moguća je i preciznija kontrola mjerenja temperature.

Homogenost temperature od najveće je važnosti, budući da je doprinos nesigurnosti zbog standardnog termometra poznat iz potvrde o umjeravanju termometra. Termostatirane uljne kupke mogu imati različitu konstrukciju (oblik i veličinu), izolaciju, regulaciju temperature, itd., ali uvijek se može primijetiti nehomogenost unutar radne tvari zbog gradijenata temperature. Puno termostatiranih kupki ima cilindrični oblik ili se iznutra koriste izotermalni blokovi, pa je zbog toga prikladnije govoriti o aksijalnom i radijalnom gradijentu u cilindričnim koordinatama.

2.1. Temperaturni gradijenti



Slika 1. Prikaz temperaturnih gradijenata

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. Numerički izraženo, temperaturni gradijent je jednak derivaciji temperature ϑ po normali n :

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

\vec{n}_0 - jedinični (ort) vektor okomit na izotermnu plohu i pozitivno je definiran u smjeru povećanja temperature

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

Radijalni gradijent predstavlja maksimalnu temperaturnu razliku između više provrta izotermalnog bloka, dok aksijalni gradijent predstavlja temperaturne razlike koje postoje unutar istog provrta, na različitoj visini.

3. ZONA UMJERAVANJA

Zona umjeravanja je imaginarno prostorno područje unutar radnog područja kupke u kojem su smješteni etalonski termometri i oni koje želimo umjeriti. Ako je izotermalni blok s provrtima smješten u kupki, onda se zona umjeravanja sastoji od samog bloka i provrta u tom bloku. Ako se u kupku stavi bilo koji drugi element, onda je zona umjeravanja koja se koristi za umjeravanje prostor koji obuhvaća taj element. U ovom zadatku bit će obrađen slučaj uz korištenje izotermalnog bloka.

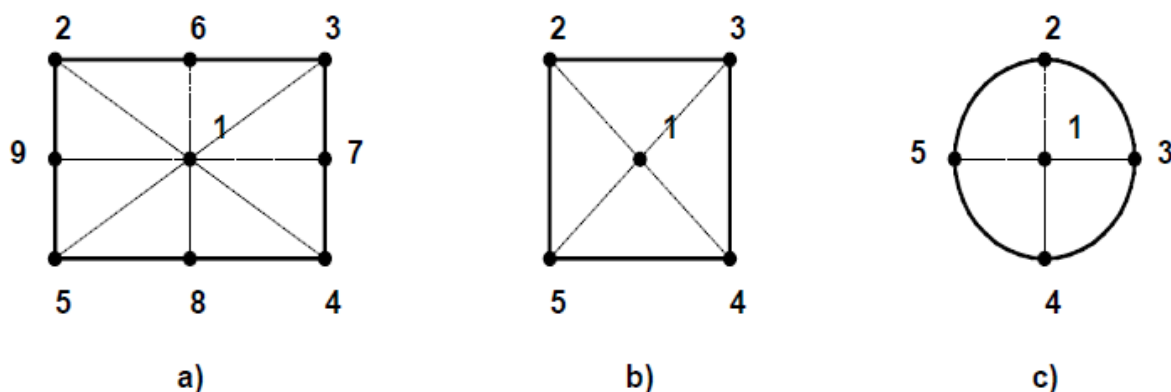
3.1. Izotermalni blok



Slika 2. Izotermalni blok

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.

Mjerna 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.

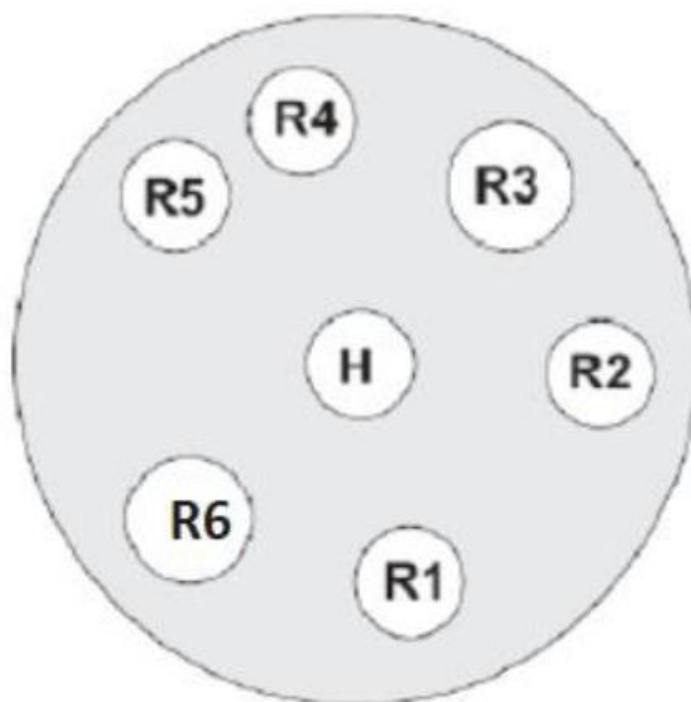


Slika 3. Prikaz mogućih mjesta ispitivanja

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

- a) Smještaj bloka unutar kupke, npr. u sredini, 20 mm od dna i slično
- b) Dimenzije kupke, npr. dubina
- c) Rupe koje su izostavljene iz procesa ispitivanja
- d) Rupe koje se ne koriste za potrebe ispitivanja, nego za rukovanje i pozicioniranje bloka
- e) 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 |

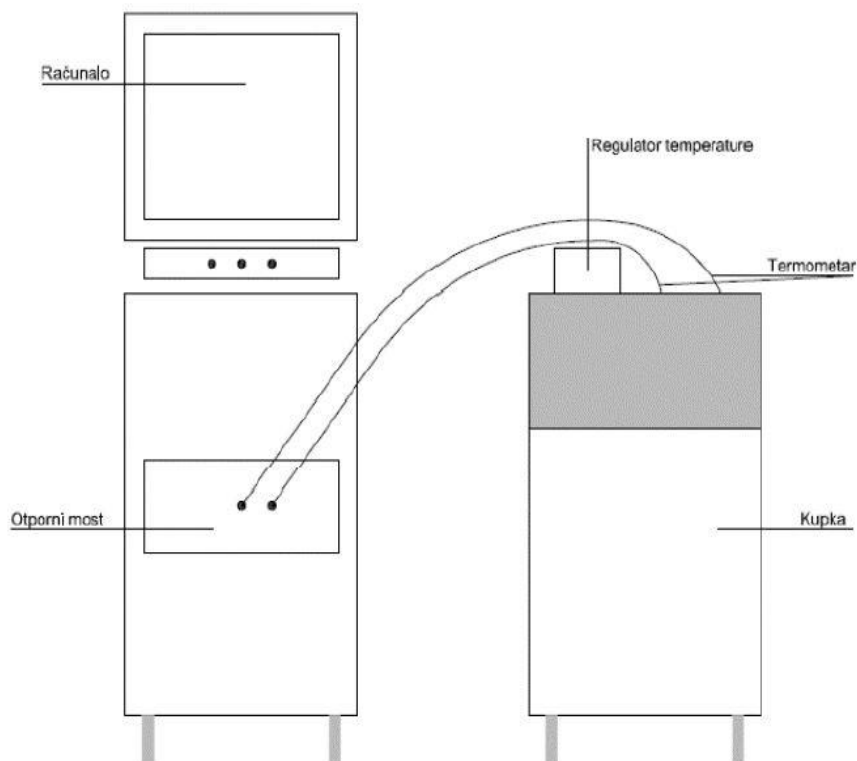
Tablica 2. Primjer podataka o provrtima

| Provrti | Promjer u mm |
|-------------------------|---------------------|
| R1 | 10 |
| R2 | 10 |
| R3 | 15 |
| R4 | 10 |
| R5 | 10 |
| R6 | 15 |
| H (za rukovanje) | 10 |

4. POPIS OPREME

Oprema korištena u postupku ispitivanja sastavni je dio Laboratorija za Procesna Mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Skica mjerne linije prikazana je na Slici 5:



Slika 5. Mjerna linija

4.1. Termostatirana kupka Leeds & Northrup



Slika 6. Termostatirana kupka Leeds & Northrup

Tablica 3. Tehnički podaci za kupku

| | | |
|-------------------------------|--------------------------------|------------------|
| Proizvođač | Leeds & Northrup Italia S.p.A. | |
| Model | TB 300 | |
| Temperaturno područje | Ulje | +30 °C do 300 °C |
| Kapacitet radnog medija | 10 litara | |
| Dimenzije | Visina | 965 mm |
| | Širina | 360 mm |
| | Dužina | 30 mm |
| Dimenzije unutrašnjosti kupke | Promjer | 100 mm |
| | Dubina | 330 mm |
| Masa | 26 kg | |
| Snaga | 1600 W | |
| Napajanje | 220 V ; 50 Hz | |

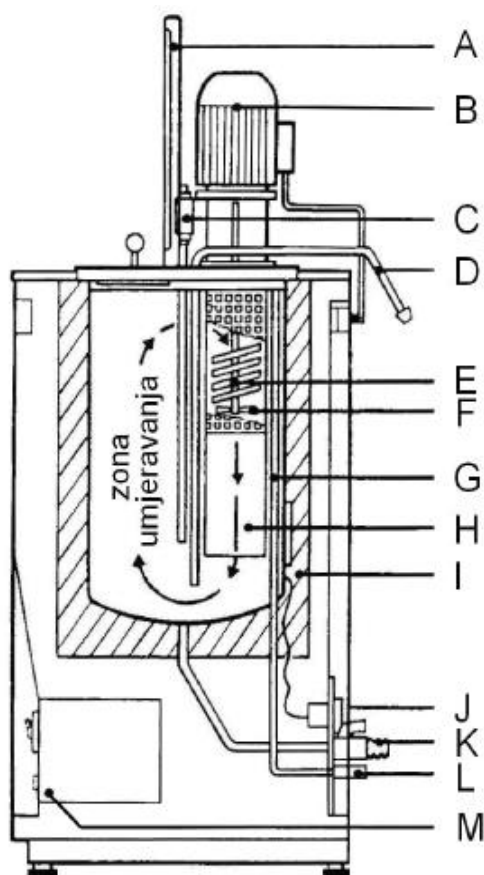
TB 300 je u potpunosti autonomna termostatorirana kupka koja se primjenjuje u laboratorijima za umjeravanje osjetnika temperature. Pruža jednostavnu i brzu primjenu, visoku točnost te širok temperaturni raspon (od +30 °C do 300 °C ili od 0 °C do 300 °C uz primjenu vanjske jedinice za hlađenje). Za regulaciju temperature zadužen je proporcionalni elektronski regulator temperature sa platinskim otporničkim termometrom TEP 21 kao osjetnikom temperature.

Odabir radnog medija kupke ovisi o temperaturi koju se želi postići unutar kupke, a temperaturno područje primjene preporučenih radnih medija dano je u Tablici 4.

Tablica 4. Odabir radnog medija za Leeds & Northrup kupku

| Područje primjene | Radni medij |
|-------------------|---------------------------------------|
| 20 °C do 80 °C | Voda |
| 50°C do 150 °C | Silikonsko ulje |
| 20°C do 180 °C | Silikonsko ulje za visoke temperature |

Presjek kupke prikazan je na Slici 7 zajedno sa oznakama svih glavnih dijelova.



A – kontrolni termometar; B – elektromotor; C – termometar (TEPOT 21); D – priključak za rashladni medij; E – grijači; F – mješalica; G – posuda za radni medij kupke od nehrđajućeg čelika; H – cijev za usmjeravanje protoka; I – izolacija; J – sigurnosni termostat; K – odvod za pražnjenje kupke; L – odvod za višak tekućine; M – regulator temperature

Slika 7. Presjek termostatirane kupke Leeds & Northrup

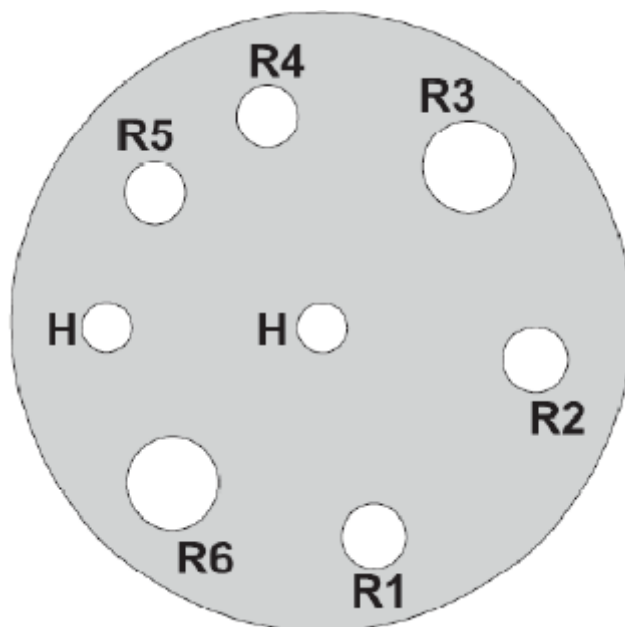
Homogenost i stalnost temperature koje deklarira proizvođač dane su u Tablici 5.

Tablica 5. Deklarirana homogenost i stalnost termostatirane kupke Leeds & Northrup

| Radni medij | Homogenost | Stalnost |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Voda | $\pm 0,04 \text{ }^{\circ}\text{C}$ | $\pm 0,03 \text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| Silikonsko ulje (do $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$) | $\pm 0,05 \text{ }^{\circ}\text{C}$ | $\pm 0,04 \text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| Silikonsko ulje (do $230 \text{ }^{\circ}\text{C}$) | $\pm 0,05 \text{ }^{\circ}\text{C}$ | $\pm 0,05 \text{ }^{\circ}\text{C}$ |

4.2. Izotermalni blok

Izotermalni blok izrađen je od bakra, te presvučen tankim slojem nikla. Na Slici 8 prikazan je položaj provrta na izotermalnom bloku, a dimenzije su dane u Tablici 6.



Slika 8. Položaj provrta na izotermalnom bloku

Blok je smješten u središte radnog volumena kupke. Rupe sa oznakom H služe za smještaj držača bloka.

Tablica 6. Podaci o izotermalnom bloku

| Izotermalni blok | |
|---------------------|-------|
| Materijal | Bakar |
| Promjer, mm | 100 |
| Visina, mm | 240 |
| Dubina rupa, mm | 225 |
| Referentna rupa, mm | R1 |

Tablica 7. Podaci o provrtima bloka

| Provrti | Promjer u mm |
|---------|--------------|
| R1 | 10,5 |
| R2 | 10,5 |
| R3 | 15 |
| R4 | 10 |
| R5 | 10 |
| R6 | 15 |

4.3. Termometri

Pri umjeravanju su korišteni etalonski otpornički termometri internih oznaka TEPOT21 i TEPOT 22.

Termometri korišteni pri umjeravanju su jedni od najboljih sekundarnih standardnih interpolacijskih instrumenata za pretvaranje temperature u otpor. Koriste se u području od -200 °C do 661 °C (ITS-90). Termometri se žare na odgovarajućim temperaturama i precizno testiraju na stabilnost. Osjetljivi element proizveden je korištenjem visoko čiste platinaste žice. Povezuju se s termometrijskim otporničkim mostom pomoću četiri žice.

Tablica 8. Tehnički podaci otporničkih termometara

| | |
|-----------------------|--|
| Proizvođač | Fluke/Hart Scientific |
| Model | 5628 |
| Nominalni otpor | 25,5 Ω |
| Temperaturno područje | -200 °C do 661 °C |
| Točnost | 6mK do 15mK (u području -200 °C do 420 °C) |
| Dimenzije | Ø6.5 mm x 510mm, spojni vodovi 2m |



Slika 9. Otpornički termometri korišteni za umjeravanje kupke

4.4. Oprema za mjerenje 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).

Izmjenički otpornički most F700 odabran je za mjerenje otpora platinskih otporničkih termometara. Može mjeriti otpore u području od 0.25Ω do 400Ω . Otpornički most F700 u mogućnosti je koristiti više različitih platinskih otporničkih termometara za postizanje preciznog mjerenja temperature, a u tu svrhu, na njega je priključen multipleksor ASL 158. Etalonski fiksni otpornik, proizvođača Tinsley (vrijednosti 100Ω u kućištu) i multipleksor u kombinaciji s mostom omogućuju mjerenje otpora termometara. Multipleksor ima 10 kanala za povezivanje termometara na most.

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.

U Tablicama 9., 10. i 11. dani su tehnički podaci uređaja za mjerenje otpora termometara, dok je na Slici 10. dan prikaz termometrijskog otporničkog mosta F700 sa spojenim termometrima:

Tablica 9. 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 |
| Masa | 7 kg | |

Tablica 10. 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 |
| Masa | 7 kg | |

Tablica 11. Tehnički podaci otporniškog 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 | |



Slika 10. Termometrijski otpornički most F700

4.5. Računalo

Pomoću računala, bio je omogućen prikaz i spremanje rezultata mjerenja. Na računalo je instaliran program za akviziciju podataka koji je izrađen u programskom paketu LabView. Program je korišten za pretvaranje očitavanja otpora u pripadajuće temperature.

5. POSTUPAK ISPITIVANJA

Općeniti postupak ispitivanja:

- a) Od sobne temperature do prve točke ispitivanja: bilježi se rast ili pad temperature sve do stanja mirovanja.
- b) Pri točki ispitivanja (stacionarna temperatura), određuju se mjerna nesigurnost i prostorni gradijenti.
- c) Prelazak na sljedeću točku ispitivanja, uz ponovno bilježenje temperaturnih gradijenata do stanja mirovanja.

Prije samog ispitivanja, potrebno je zadovoljiti zadane okolišne uvjete u laboratoriju i provesti pripremu mjerenja.

5.1. Uvjeti okoliša

Kako bi bili u mogućnosti provesti uspješno mjerenje, potrebno je zadovoljiti određene uvjete okoliša tijekom cijelog vremena umjeravanja:

- Sobna temperatura mora biti između 15 °C i 35 °C, uz promjenu temperature manju od ± 3 °C tijekom umjeravanja
- Relativna vlažnost zraka mora biti između 25 %RH i 75 %RH.

5.2. Priprema mjerenja

Da bi se mjerenje moglo provesti, potrebno je:

- Postaviti uređaje za mjerenje temperature i relativne vlažnosti vanjskog zraka u blizini ispitivane kupke, i pričekati dok se rezultati mjerenja stacioniraju.
- Ispuniti prvi dio izvješća o mjerenju koji se odnosi na karakteristike mjerne opreme koje utječu na mjernu nesigurnost
- Skicirati prostorni prikaz prostornih točaka u kojima se vrše mjerenja
- Pripremiti digitalne termometre

5.3. Temperature ispitivanja

Pri umjeravanju termometara, ispitivanje treba biti provedeno pri minimalno 3 temperature:

- Minimalna temperatura tijekom umjeravanja
- Srednja temperatura tijekom umjeravanja
- Maksimalna temperatura tijekom umjeravanja

Moguće je, također, promatrati dodatne temperature koje se javljaju tijekom umjeravanja, ukoliko se želi steći bolji uvid u zonu umjeravanja.

Ako je zona umjeravanja mala ili se koristi samo za određene temperature, moguće je ispitivanje provesti pri jednoj ili dvije temperature.

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

5.4. Određivanje stalnosti temperature

Vremenska stalnost temperature uglavnom ovisi o preciznosti temperaturnog regulatora, konstrukciji uljne kupke i protoku radnog medija kroz kupku. S obzirom na to da su umjeravanja vršena u kratkom vremenskom razmaku (odabrano 40 sekundi), kratkotrajna stabilnost medija u kupki je važna. Stoga su rezultati umjeravanja termometara prikazani u razdoblju od 30 minuta.

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

$$u_{\text{stalnost}} = \frac{1}{\sqrt{3}} (T_{\text{avg}} - |T_{\text{max,min}}|) \quad (2)$$

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

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

5.5. Homogenost temperature u radijalnom smjeru

Postupak:

- a) Odabire se jedan termometar (TEPOT21) kao referentni i postavlja se na referentnu poziciju ili rupu (RR=R1) i to na najnižu točku mjerenja ($h=0$), gdje ostaje tokom čitavog mjerenja.
- b) Drugi termometar (TEPOT22) postavlja se na jednu od definiranih pozicija za mjerenje radijalnih gradijenata (R2, R3, R4, R5 ili R6), na istoj visini h na kojoj se nalazi referentni termometar.
- c) Bilježe se temperature očitane sa svih termometara u određenom trajanju (odabrano 10 minuta) u kratkim vremenskim intervalima (odabrano 40 sekundi).
- d) Termometar T2 se premješta na slijedeću poziciju i ponavlja se točka c).

5.6. Homogenost temperature u aksijalnom smjeru

Postupak:

- a) Odabire se jedan termometar (TEPOT21) kao referentni i postavlja se na referentnu poziciju ili rupu (RR=R1) i to na najnižu točku mjerenja ($h=0$ mm), gdje ostaje tokom čitavog mjerenja.
- b) Drugi termometar (TEPOT22) postavlja se na jednu od definiranih pozicija za mjerenje aksijalnih gradijenata (odabrano R2). Početno je uronjen do najniže točke mjerenja.
- c) Vršiti se bilježenje temperatura svih termometara u određenom trajanju (odabrano 10 minuta) u kratkim vremenskim intervalima (odabrano 40 sekundi).
- d) Termometar TEPOT22 se vertikalno pomiče za određenu visinu (odabrano 20 mm, 40 mm, 60 mm i 80 mm iznad $h=0$ mm) i postupak se ponavlja počevši od točke c).

5.7. Ukupna mjerna nesigurnost u zoni umjeravanja

Rezultati mjerenja pokretnog termometra se uspoređuju sa rezultatima referentnog, tj. fiksnog termometra. Zbog toga što se sva mjerenja ne mogu provesti istovremeno, potrebno je izvršiti ispravke pri umjeravanju pomičnog termometra u odnosu na referentni. Rezultati pomičnog termometra su korigirani za pomak temperature referentnog termometra od njegove srednje vrijednosti. Nakon korekcije rezultata pomičnog termometra, skicirana je tablica za svaki termometar. Tablica sadrži korigirane prosječne vrijednosti temperatura za sva mjerenja.

Doprinos radijalnog gradijenta temperature ukupnoj mjernoj nesigurnosti se računa iz jednadžbe:

$$u_{\text{rad},i} = \frac{\max|\vartheta_{\text{avg,RR}} - \vartheta_{\text{avg,RX}}|}{\sqrt{3}}, \quad (3)$$

$$u_{\text{rad},i} = \max[u_{\text{rad},i}] \quad (4)$$

Doprinos aksijalnog gradijenta temperature ukupnoj mjernoj nesigurnosti se računa pomoću jednadžbe:

$$u_{\text{aks},i} = \frac{\vartheta_{\text{avg,RR},h} - \vartheta_{\text{avg,RX},h}}{\sqrt{3}}, \quad (5)$$

$$u_{\text{aks}} = \max[u_{\text{aks},i}] \quad (6)$$

, gdje h predstavlja visinu na kojoj se termometar nalazi u odnosu na dno kupke.

Homogenost temperature, koja sadrži radijalne i aksijalne gradijente, računa se iz jednadžbe:

$$u_{\text{hom}} = \sqrt{u_{\text{rad}}^2 + u_{\text{aks}}^2} \quad (7)$$

Ukupna mjerna nesigurnost kupke, uzrokovana radijalnim i aksijalnim gradijentima te nestabilnošću temperature, računa se prema jednadžbi:

$$u_{\text{uk}} = \sqrt{u_{\text{hom}}^2 + u_{\text{stalnost}}^2} \quad (8)$$

6. REZULTATI ISPITIVANJA

Ispitivanje kupke provedeno je u temperaturnom području od 60 °C do 170 °C.

6.1. Radijalna homogenost temperature

Tablica 12. Homogenost temperature u radijalnom smjeru za 60 °C – rezultati

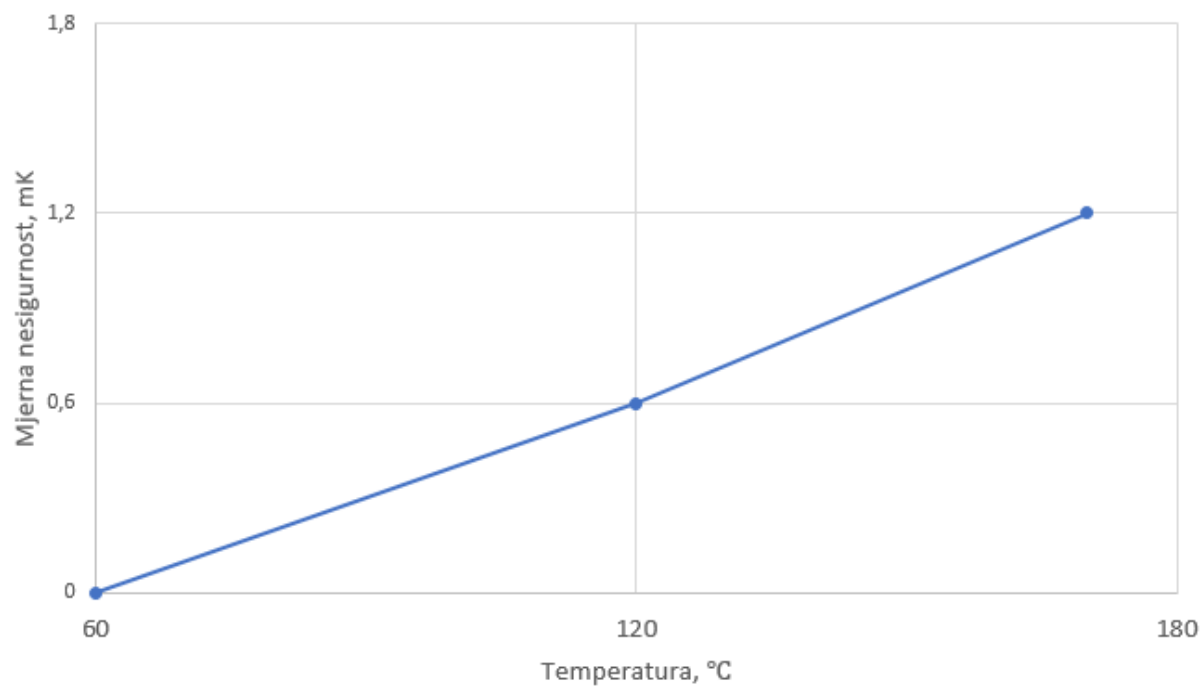
| Temperatura ispitivanja: 60 °C | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| Referentna pozicija: RR=R6 | | | | | | |
| Termometar T1: TEPOT 21 | | | | | | |
| Termometar T2: TEPOT 22 | | | | | | |
| T1 | T2 | | | | | u_{rad}, mK |
| RR=R6 | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | |
| 60,091 | 60,091 | | | | | 0 |
| 60,092 | | 60,092 | | | | 0 |
| 60,090 | | | 60,090 | | | 0 |
| 60,092 | | | | 60,092 | | 0 |
| 60,091 | | | | | 60,091 | 0 |
| Maksimalna vrijednost, u_{rad} (60 °C), mK | | | | | | 0 |

Tablica 13. Homogenost temperature u radijalnom smjeru za 120 °C – rezultati

| Temperatura ispitivanja: 120 °C | | | | | | |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|----------------------|
| Referentna pozicija: RR=R6 | | | | | | |
| Termometar T1: TEPOT 21 | | | | | | |
| Termometar T2: TEPOT 22 | | | | | | |
| T1 | T2 | | | | | u_{rad}, mK |
| RR=R6 | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | |
| 120,071 | 120,071 | | | | | 0 |
| 120,050 | | 120,049 | | | | 0,6 |
| 120,049 | | | 120,048 | | | 0,6 |
| 120,054 | | | | 120,054 | | 0 |
| 120,058 | | | | | 120,057 | 0,6 |
| Maksimalna vrijednost, u_{rad} (120 °C), mK | | | | | | 0,6 |

Tablica 14. Homogenost temperature u radijalnom smjeru za 170 °C – rezultati

| Temperatura ispitivanja: 170 °C | | | | | | |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|----------------------|
| Referentna pozicija: RR=R6 | | | | | | |
| Termometar T1: TEPOT 21 | | | | | | |
| Termometar T2: TEPOT 22 | | | | | | |
| T1 | T2 | | | | | u_{rad}, mK |
| RR=R6 | R1 | R2 | R3 | R4 | R5 | |
| 169,982 | 169,983 | | | | | 0,6 |
| 170,002 | | 170,004 | | | | 1,2 |
| 170,004 | | | 170,004 | | | 0 |
| 169,999 | | | | 169,998 | | 0,6 |
| 170,004 | | | | | 170,004 | 0 |
| Maksimalna vrijednost, u_{rad} (170 °C), mK | | | | | | 1,2 |

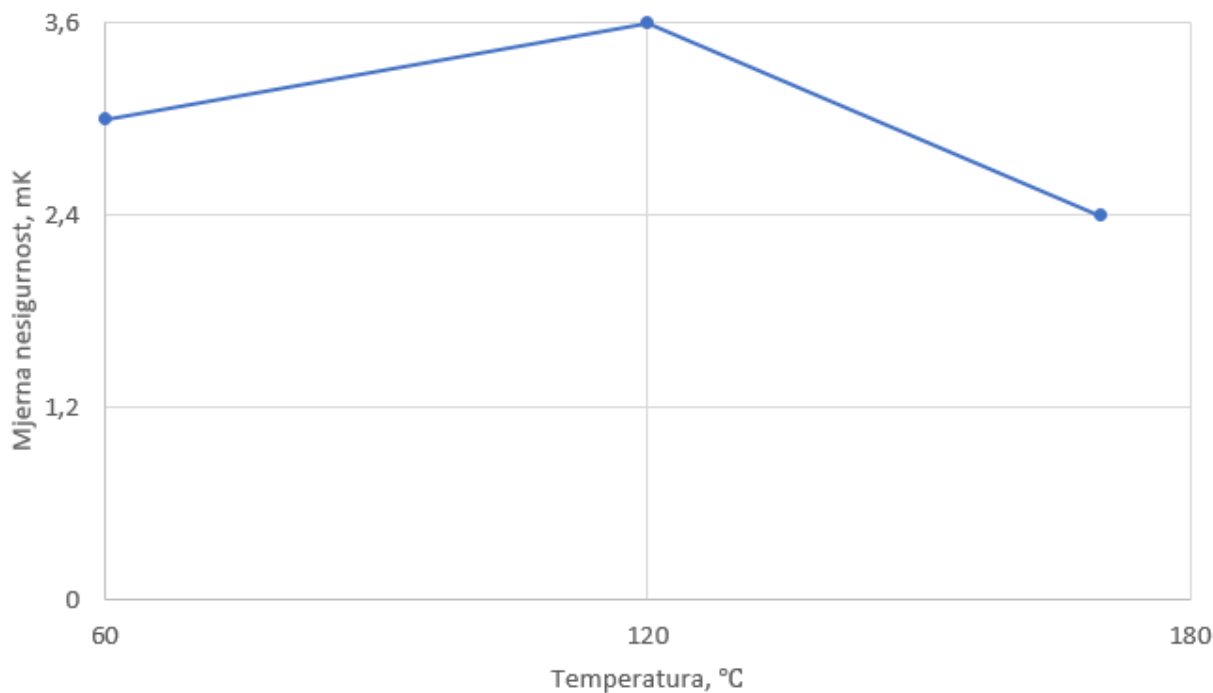


Slika 11. Mjerna nesigurnost zbog radijalne nehomogenosti

6.2. Aksijalna homogenost temperature

Tablica 15. Homogenost temperature u aksijalnom smjeru – rezultati

| Referentna pozicija: RR=R2 | | | | | | | |
|--|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|---------------|
| Termometar T1: TEPOT 21 | | | | | | | |
| Termometar T2: TEPOT 22 | | | | | | | |
| Temperatura, °C | T1 | T2 | | | | | u_{aks}, mK |
| | h=0 mm | h=0 mm | h=20 mm | h=40 mm | h=60 mm | h=80 mm | |
| 60 | 60,094 | 60,094 | | | | | 0 |
| | 60,098 | | 60,097 | | | | 0,6 |
| | 60,099 | | | 60,096 | | | 1,8 |
| | 60,102 | | | | 60,098 | | 2,4 |
| | 60,105 | | | | | 60,100 | 3 |
| Maksimalna vrijednost, u_{aks} (60 °C) , mK | | | | | | | 3 |
| 120 | 120,071 | 120,071 | | | | | 0 |
| | 120,067 | | 120,065 | | | | 1,2 |
| | 120,067 | | | 120,064 | | | 1,8 |
| | 120,067 | | | | 120,062 | | 3 |
| | 120,061 | | | | | 120,055 | 3,6 |
| Maksimalna vrijednost, u_{aks} (120 °C) , mK | | | | | | | 3,6 |
| 170 | 169,982 | 169,983 | | | | | 0,6 |
| | 169,980 | | 169,979 | | | | 0,6 |
| | 169,985 | | | 169,983 | | | 1,2 |
| | 169,998 | | | | 169,997 | | 0,6 |
| | 170,003 | | | | | 169,999 | 2,4 |
| Maksimalna vrijednost, u_{aks} (170 °C) , mK | | | | | | | 2,4 |

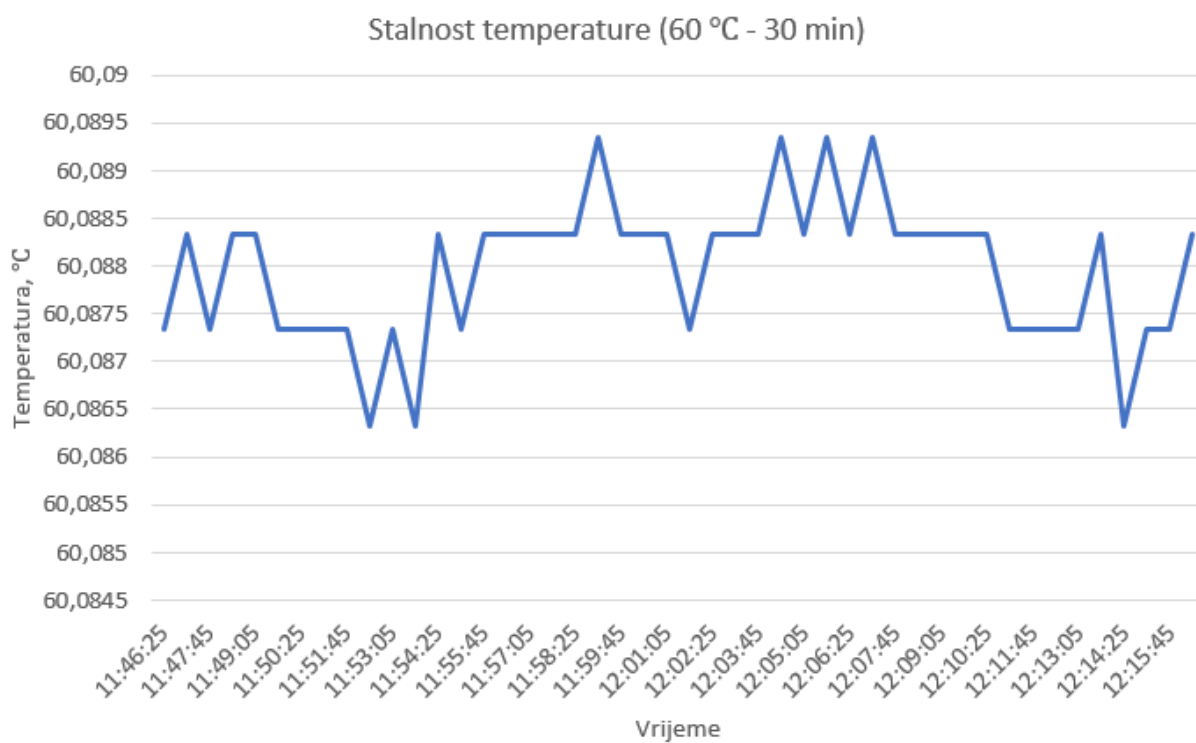


Slika 12. Mjerna nesigurnost zbog aksijalne nehomogenosti

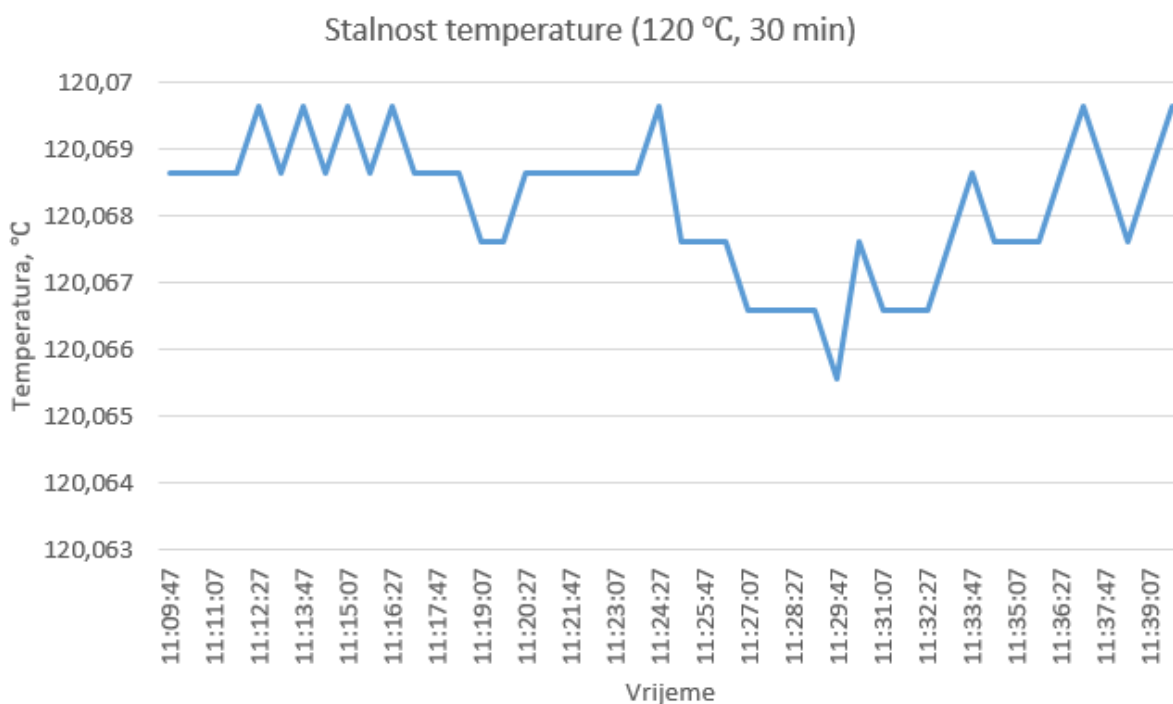
6.3. Stalnost temperature

Tablica 16. Mjerna nesigurnost stalnosti temperature

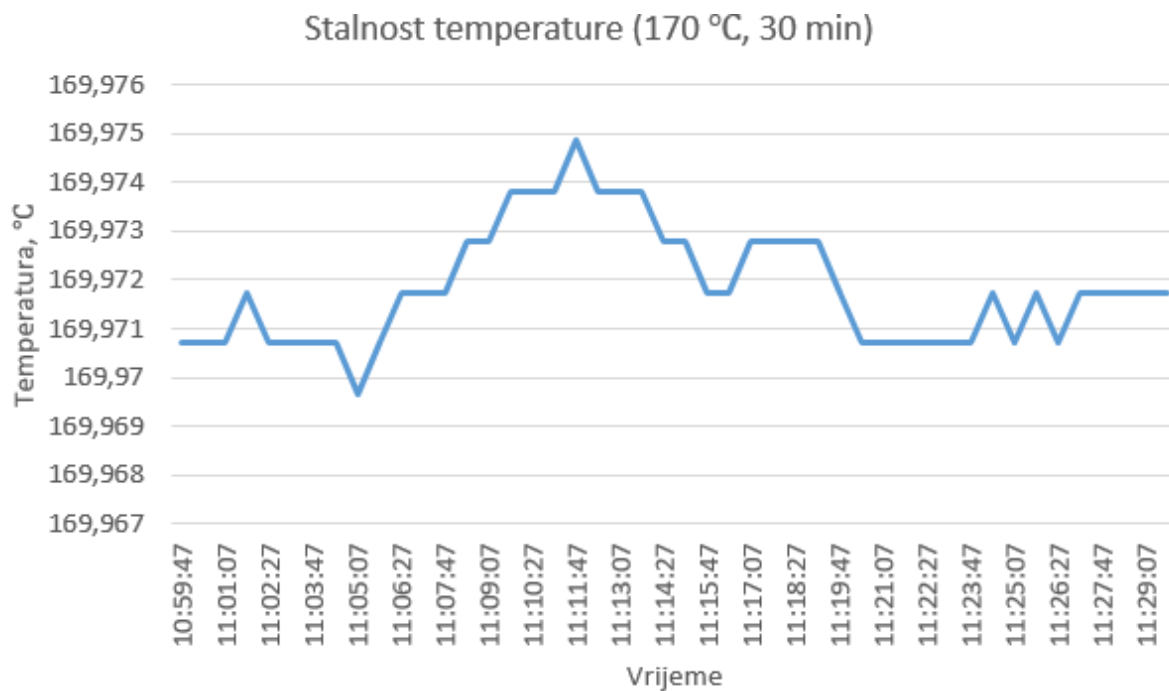
| Provrt | RR=R2 | Senzor | TE-POT21 |
|----------------------------|------------|---|-------------------------------------|
| Rezultati | | | |
| Ispitna temperatura, °C | Raspon, mK | Najveće odstupanje od srednje vrijednosti <i>a</i> , mK | Mjerna nesigurnost <i>u</i> , mK |
| 60 | 3 | 1,6 | 1 |
| 120 | 4 | 2,6 | 1,5 |
| 170 | 5 | 3 | 1,7 |
| Max. vrijednost | 5 | 3 | 1,7 |



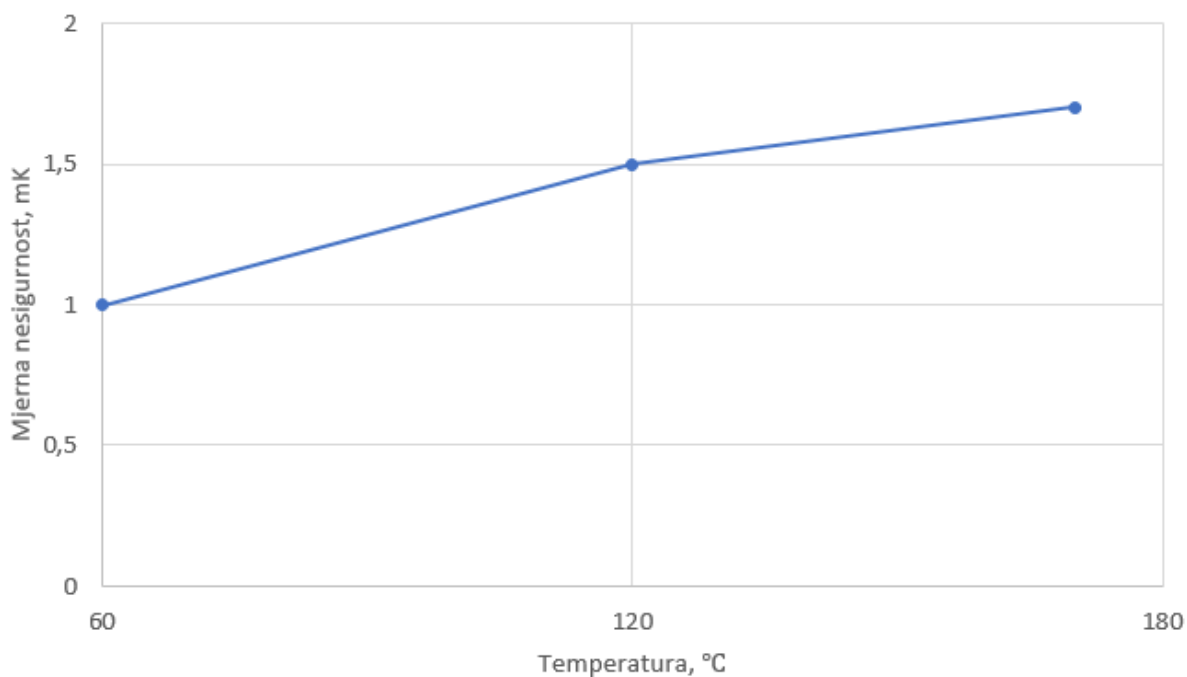
Slika 13. 30 minutna stalnost temperature pri 60 °C



Slika 14. 30 minutna stalnost temperature pri 120 °C



Slika 15. 30 minutna stalnost temperature pri 170 °C



Slika 16. Mjerna nesigurnost stalnosti temperature

Tablica 17. Ukupna mjerna nesigurnost (60 °C)

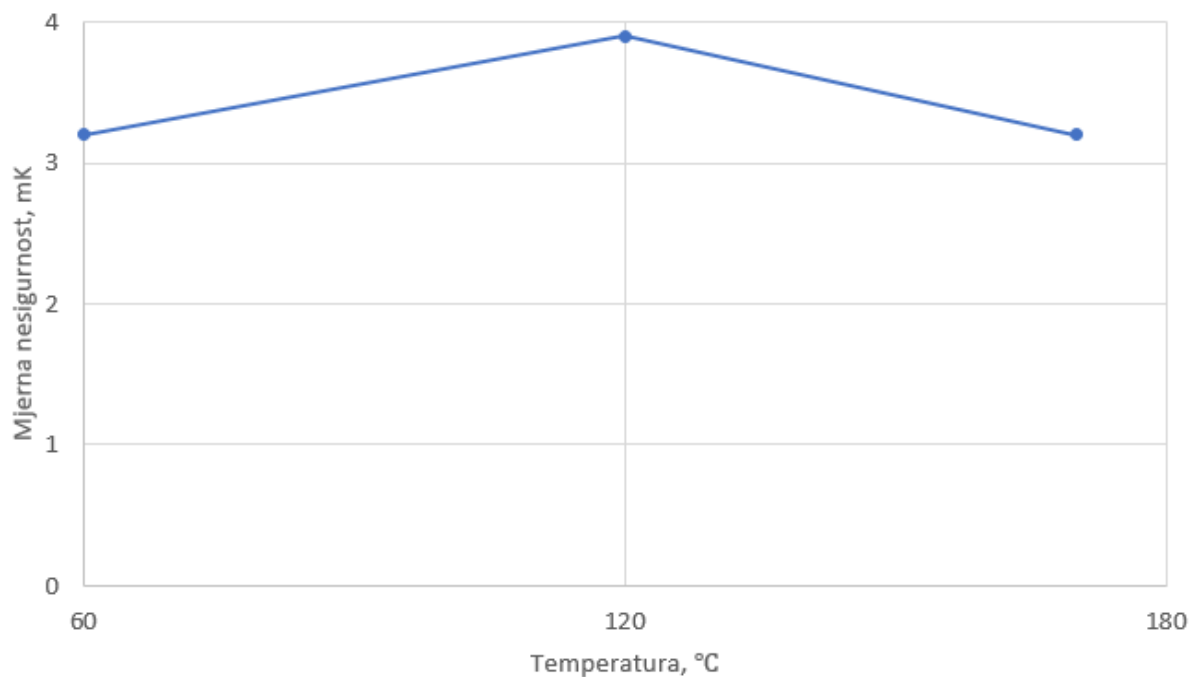
| Ispitna temperatura, °C | 60 °C | | |
|----------------------------|--------------|----------------|----------------|
| Izvor nesigurnosti | Distribucija | <i>a</i> mK | <i>u</i> mK |
| Radijalni gradijenti | Pravokutna | 0 | 0 |
| Aksijalni gradijenti | Pravokutna | 5,2 | 3 |
| Stalnost temperature | Pravokutna | 1,7 | 1 |
| | | | |
| Kombinirana nesigurnost | k=1 | 5,5 | 3,2 |
| Proširena nesigurnost | k=2 | 11 | 6,4 |

Tablica 18. Ukupna mjerna nesigurnost (120 °C)

| Ispitna temperatura, °C | 120 °C | | |
|----------------------------|--------------|----------------|----------------|
| Izvor nesigurnosti | Distribucija | <i>a</i> mK | <i>u</i> mK |
| Radijalni gradijenti | Pravokutna | 1 | 0,6 |
| Aksijalni gradijenti | Pravokutna | 6,2 | 3,6 |
| Stalnost temperature | Pravokutna | 2,6 | 1,5 |
| | | | |
| Kombinirana nesigurnost | k=1 | 6,8 | 3,9 |
| Proširena nesigurnost | k=2 | 13,6 | 7,8 |

Tablica 19. Ukupna mjerna nesigurnost (170 °C)

| Ispitna temperatura, °C | 170 °C | | |
|----------------------------|--------------|----------------|----------------|
| Izvor nesigurnosti | Distribucija | <i>a</i> mK | <i>u</i> mK |
| Radijalni gradijenti | Pravokutna | 2,1 | 1,2 |
| Aksijalni gradijenti | Pravokutna | 4,2 | 2,4 |
| Stalnost temperature | Pravokutna | 2,9 | 1,7 |
| | | | |
| Kombinirana nesigurnost | k=1 | 5,5 | 3,2 |
| Proširena nesigurnost | k=2 | 11 | 6,4 |



Slika 17. Ukupna mjerna nesigurnost

7. ZAKLJUČAK

Ispitivanja termostatiranih kupki provode se s ciljem dobivanja točnog uvida u njihova svojstva i ponašanje u zadanim uvjetima kako bi se u njima što pouzdanije moglo provoditi umjeravanje termometara.

Cilj ispitivanja bio je upoznati se s karakteristikama radijalne i aksijalne homogenosti, te stalnosti temperature unutar radnog volumena 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. U ispitivanju su korištena 2 etalonska platinska otpornička termometra. Termostatirana kupka ispitana je u temperaturnim točkama 60 °C, 120 °C i 170 °C.

Utvrđeni doprinos nesigurnosti kupke ukupnoj nesigurnosti umjeravanja termometara iznosi 3,2 mK na temperaturi 60 °C, 3,9 mK na temperaturi 120 °C i 3,2 mK na temperaturi 170 °C. Iz rezultata ispitivanja može se vidjeti da kupka najviše doprinosi nesigurnosti umjeravanja temperaturi 120 °C. Isto tako je vidljivo da najveći doprinos nesigurnosti kupke na pojedinoj temperaturi imaju aksijalni gradijenti. Rezultati ispitivanja pokazali su ispravnost termostatirane kupke Leeds & Norhtrup, čime je dokazano da se ona može koristiti za precizno umjeravanje termometara.

LITERATURA

- [1] Drnovšek, J., Bojkovski J., Pušnik I.: A general procedure for evaluation of calibration baths in precision temperature measurements, IEE Xplore, 2008.
- [2] Šestan, D., Jugović A.: Evaluation of calibration baths with two precision thermometers, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [3] Testing of isothermal zones, Laboratorij za procesna mjerenja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2003.
- [4] Radman, N.: Ispitivanje karakteristika zona kontrolirane temperature, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [5] Galović, A.: Termodinamika II, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [6] Leeds & Northrup Italia: Thermostatic bath TB300 Handbook, 1988.

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija