

Ispitivanje karakteristika fluidizirane kupke

Župan, Iva

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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:235:645618>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-28**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Iva Župan

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Iva Župan

Zagreb, 2021.

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 i stručnim savjetima tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se asistentu Ivanu Matasu na pomoći tijekom mjernih ispitivanja.

Zahvaljujem se obitelji i prijateljima na podršci tijekom cijelog studija.

Iva Župan



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Iva Župan** Mat. br.: **0035209677**

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

Naslov rada na engleskom jeziku: **Characterization of fluidised calibration bath**

Opis zadatka:

Potrebno je definirati i provesti postupak ispitivanja karakteristika fluidizirane kupke, u temperaturnom području od 180 °C do 660 °C. Fluidizirana 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 fluidizirane kupke sa skicom radnog volumena i shematskim prikazom elemenata za regulaciju temperature.
- Opisati postupak ispitivanja zone kontrolirane temperature, koji uključuje određivanje horizontalnih i vertikalnih temperaturnih gradijenata te stabilnosti temperature u radnom volumenu kupke.
- Izraditi shematski prikaz mjerne linije za provedbu ispitivanja, pri čemu je linija sastavljena od instrumenata i pomoćne opreme koja je na raspolaganju u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje (FSB-LPM).
- Priložiti rezultate ispitivanja s određenim doprinosima fluidizirane kupke ukupnoj mjernoj nesigurnosti, kada se ona koristi za umjeravanje termometara.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

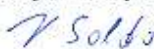
Zadatak zadan:
30. studenoga 2020.

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

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

Zadatak zadao:


Doc. dr. sc. Danijel Šestan

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	III
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1. UVOD.....	1
2. FLUIDIZIRANA KUPKA	2
2.1. Temperaturni gradijenti.....	2
3. ZONA UMJERAVANJA	4
3.1. Izotermalni blok	4
4. KARAKTERIZACIJA IZOTERMALNE ZONE	6
4.1. Ispitne temperature.....	6
4.2. Homogenost temperature u radijalnom smjeru	7
4.3. Homogenost temperature u aksijalnom smjeru.....	8
4.4. Stabilnost temperature.....	9
4.4.1. Kombinirani i prošireni doprinos zoni nesigurnosti	9
5. POPIS OPREME	10
5.1. Fluidizirana kupka s pripadajućim izotermalnim blokom	11
5.1.1. Protok zraka i aluminijev oksid	12
5.2. Termometri.....	13
5.3. Oprema za mjerenje otpora termometra.....	13
5.3.1. Termometrijski otpornički most.....	14
5.3.2. Multipleksor.....	15
5.4. Računalo.....	16
6. POSTUPAK ISPITIVANJA.....	17
6.1. Okolišni uvjeti.....	17
6.2. Priprema mjerenja	17
7. REZULTATI ISPITIVANJA	18
8. ZAKLJUČAK.....	29
LITERATURA.....	30
PRILOZI.....	31

POPIS SLIKA

Slika 1.	Prikaz temperaturnih gradijenata	2
Slika 2.	Izotermalni blok	4
Slika 3.	Prikaz mogućih položaja termometara	5
Slika 4.	Prikaz mjerene linije	10
Slika 5.	Fluidizirana kupka 875.....	11
Slika 6.	Shematski prikaz izotermalnog bloka	12
Slika 7.	Platinski otpornički termometri	13
Slika 8.	Termometrijski otpornički most.....	14
Slika 9.	Multipleksor sa spojenim termometrima	15
Slika 10.	Fiksni otpornik Tinsley 5685 A, 100 Ω	16
Slika 11.	Mjerna nesigurnost zbog radijalne nehomogenosti	20
Slika 12.	Mjerna nesigurnost zbog aksijalne nehomogenosti	23
Slika 13.	30 minutna stalnost temperature pri 200 °C.....	23
Slika 14.	30 minutna stalnost temperature pri 400 °C.....	24
Slika 15.	30 minutna stalnost temperature pri 500 °C.....	24
Slika 16.	30 minutna stabilnost pri 600 °C.....	25
Slika 17.	Mjerna nesigurnost stalnosti temperature	26
Slika 18.	Ukupna mjerna nesigurnost	28

POPIS TABLICA

Tablica 1. Tehnički podaci za kupku	11
Tablica 2. Fizikalne veličine kupke.....	12
Tablica 3. Tehnički podaci otporničkih termometara	13
Tablica 4. Tehnički podaci otporničkog mosta	14
Tablica 5. Tehnički podaci multipleksora	15
Tablica 6. Homogenost temperature u radijalnom smjeru – 200 °C.....	18
Tablica 7. Homogenost temperature u radijalnom smjeru – 400 °C.....	18
Tablica 8. Homogenost temperature u radijalnom smjeru – 500 °C.....	19
Tablica 9. Homogenost temperature u radijalnom smjeru – 600 °C.....	19
Tablica 10. Homogenost temperature u aksijalnom smjeru – 200 °C.....	21
Tablica 11. Homogenost temperature u aksijalnom smjeru – 400 °C.....	21
Tablica 12. Homogenost temperature u aksijalnom smjeru – 500 °C.....	22
Tablica 13. Homogenost temperature u aksijalnom smjeru – 600 °C.....	22
Tablica 14. Mjerna nesigurnost stalnosti temperature	25
Tablica 15. Ukupna mjerna nesigurnost (200 °C).....	26
Tablica 16. Ukupna mjerna nesigurnost (400 °C).....	27
Tablica 17. Ukupna mjerna nesigurnost (500 °C).....	27
Tablica 18. Ukupna mjerna nesigurnost (600 °C).....	28

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
ϑ	K	temperatura
<i>grad</i> ϑ	K/m	temperaturni gradijent
RR	-	referentna rupa u izotermalnom bloku
RX	-	oznaka rupe u izotermalnom bloku, X=1,2..
a	mK	interval pravokutne razdiobe
u	K	standardna mjerna nesigurnost za k=1
U	K	proširena mjerna nesigurnost za k=2
h	mm	visina podizanja termometra
RH	-	interval vlažnosti
TEPOT	-	interna oznaka platinskog otporničkog termometra
Tn	-	oznaka termometra

SAŽETAK

Osnovni zadatak ovog završnog rada je ispitivanje karakteristika fluidizirane kupke s aluminijevim oksidom, u temperaturnom rasponu od 200 °C do 600 °C, koja služi za umjeravanje termometara. Potrebno je odrediti parametre koji imaju utjecaj na nesigurnost usporednog umjeravanja termometara u kupki. Ispitivanjem je obuhvaćena karakterizacija zone kontrolirane temperature što uključuje određivanje radijalnih i aksijalnih gradijenata te temperaturnu stabilnost, metodom koja se koristi u Laboratoriju za procesna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Nadalje je metoda detaljno objašnjena sa pripadajućim formulama i parametrima. Također je i opisan postupak mjerenja te su dani i opisi korištene opreme i uvjeti mjerenja.

Na kraju su prikazani rezultati ispitivanja u zadanim točkama s određenim doprinosima ukupnoj mjernoj nesigurnosti.

Ključne riječi: fluidizirana kupka, temperaturni gradijenti, mjerna nesigurnost

SUMMARY

The main goal of this paper is to describe testing of characteristics of a fluidised calibration bath, filled with alumina powder, in a temperature range from 200 °C to 600 °C. The bath is normally used for comparison calibration of thermometers. To be used for this purpose, it is necessary to periodically determine the parameters that have an impact on the uncertainty of the calibration of thermometers in the bath. The study included the determination of the controlled temperature zone, which includes the determination of radial and axial gradients and temperature stability by the method used in the Laboratory of Process Measurements at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb. Furthermore, the method is explained in detail with the corresponding formulas and parameters. The measurement procedure is also described as well as measurement conditions and the equipment that was used. Finally, the test results are given for temperature points 200 °C, 400 °C, 500 °C and 600 °C, together with the baths contributions to the overall measurements uncertainty, when it is later used for comparison calibration of thermometers.

Key words: fluidised calibration bath, temperature gradients, measurement uncertainty

1. UVOD

Tema završnog zadatka je ispitivanje karakteristike fluidizirane kupke s aluminijevim oksidom u temperaturnom području od 180 °C do 660 °C. Fluidizirana kupka koristi se za umjeravanje termometara u Laboratoriju za procesna mjerenja (LPM) na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Potrebno je ispitati svojstva kupke koja utječu na mjernu nesigurnost prilikom umjeravanja termometara.

Provodi se ispitivanje aksijalnih i radijalnih temperaturnih gradijenata unutar radnog volumena i stalnost temperature. Dobiveni podaci su potrebni jer daju detaljne podatke o karakteristikama fluidizirane kupke koji su potrebni kada se ona koristi za usporedbeno umjeravanje termometara.

Proizvođači kupki daju podatke koji nisu u potpunosti točni, većinom su precijenjeni, stoga se u laboratoriju ne može pouzdati u njih i mora se provesti neovisno ispitivanje i procjena nesigurnosti da dobiveni rezultati budu sigurni.

U svijetu ne postoji točno određena univerzalna metoda za ispitivanje, koja bih obuhvatila sve izvedbe i karakteristike kupki a kojom bi se osigurala pouzdanost dobivenih rezultata. Iz navedenog razloga svaki laboratoriji koristi svoju metodu da bi osigurao kvalitetu svojih usluga. U ovom završnom zadatku koristila se interna metoda razvijena u Laboratoriju za procesna mjerenja (LPM).

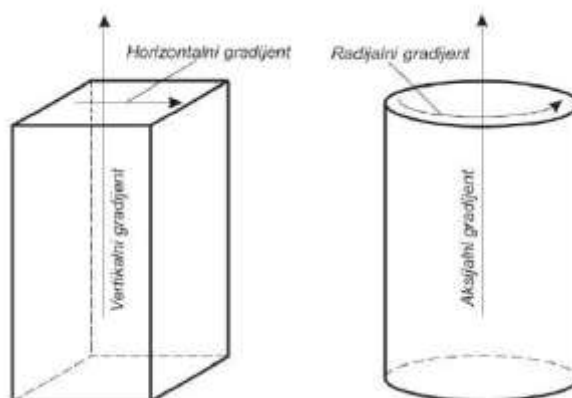
2. FLUIDIZIRANA KUPKA

Fluidizirana kupka je objekt u kojem se namješta određeni temperaturni raspon u zatvorenom radnom volumenu i služi za usporedno umjeravanje termometara. Dvije najvažnije mjeriteljske karakteristike kupke su vremenska stabilnost i homogenost koje doprinose nesigurnosti tipa B. Procjene tipa B su one koje se baziraju na ostalim informacijama, koje nisu dobivene statističkom analizom niza opažanja. One mogu biti prethodno iskustvo iz vanjskih proračuna, proizvođačkih specifikacija ili izvora kao što su knjige. Kod ove metode poznat je interval nesigurnosti u kojem se vjerojatno nalazi prava vrijednost te se takva razdioba naziva pravokutnom.

Podaci o stabilnosti i homogenosti u katalozima nisu točno definirani stoga se u laboratoriju mora izvesti samostalna procjena. Prvo se ispituje karakteristike kupke koje utječu na ukupnu mjernu nesigurnost. Točno znanje o kupkama je od iznimne važnosti zbog nepromjenjive karakteristike kupke (gradijent, nesigurnost). Generalni postupak za kupke s raznim medijima (voda, alkohol, silicijsko ulje, fluidizirana glinica u prahu, aluminijev oksid) omogućuje kontinuirano praćenje parametara kupke kako bi se pravilo ocijenili doprinosi nesigurnosti kalibriranog termometra. Fluidizirane kupke imaju širok temperaturni raspon, veliku preciznost i malu nesigurnost.

U ovom završnom radu koristila se fluidizirana kupka s aluminijevim oksidom i provedeno je ispitivanje na četiri temperature 200 °C, 400 °C, 500 °C i 600 °C.

2.1. Temperaturni gradijenti



Slika 1. Prikaz temperaturnih gradijenata

Temperaturni gradijent je promjena temperature po jedinici duljine u smjeru okomitom na plohu stalne temperature. To je vektor okomit na izotermnu plohu s pozitivnim predznakom u smjeru povećanja temperature.

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

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

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

Osnovni gradijenti koji se mogu primijeniti su radijalni i aksijalni i njih treba ocijeniti u postupku kalibracije i mjerenja. Radijalni gradijent predstavlja temperaturnu razliku između dvije rupe dok aksijalni gradijent predstavlja temperaturnu razlike koje postoje unutar iste rupe, na različitoj visini. Gradijenti se javljaju kao posljedica promjene temperature očitavanja termometra zbog njihove promjene položaja. Potrebna su dva termometra, jedan se koristi kao referentni termometar, dok se drugi pomiče radijalno i aksijalno unutar rupa bloka.

Projekcija vektora $\text{grad}\vartheta$ na koordinatne osi x, y i z:

$$(\text{grad}\vartheta)_x = \frac{\partial\vartheta}{\partial n} \cdot \cos(n, x) = \frac{\partial\vartheta}{\partial x} \quad (2)$$

$$(\text{grad}\vartheta)_y = \frac{\partial\vartheta}{\partial n} \cdot \cos(n, y) = \frac{\partial\vartheta}{\partial y} \quad (3)$$

$$(\text{grad}\vartheta)_z = \frac{\partial\vartheta}{\partial n} \cdot \cos(n, z) = \frac{\partial\vartheta}{\partial z} \quad (4)$$

3. ZONA UMJERAVANJA

Zona umjeravanja je imaginarno prostorno područje unutar postojećeg (radnog) volumena kupke u kojem su smješteni standardni termometri i oni koje želimo umjeriti. PeKupka za umjeravanje po pravilu ima izotermalni blok, tako da zona umjeravanja u tom slučaju obuhvaća blok i rupe u njemu. Kupke mogu, ali i ne moraju sadržavati izotermalne blokove. Za ovaj završni zadatak je korištena fluidizirana kupka s izotermalnim blokom. Blok je cilindričnog oblika s pet provrta u koje se smještaju termometri.

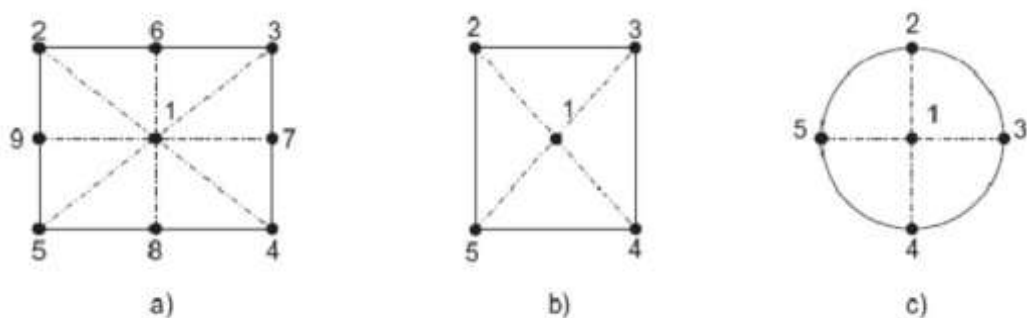
3.1. Izotermalni blok



Slika 2. Izotermalni blok

Razlike temperatura između provrta predstavljaju gradijente temperature, a izračunavaju se na način da se termometri tijekom ispitivanja premještaju iz jednog u drugi provrt. Ovim postupkom omogućeno je točno određivanje razlika temperatura u pojedinim provrtima izotermalnog bloka bez obzira na međusobna odstupanja korištenih termometara i nesigurnost njihovog umjeravanja.

Pozicije za postavljanje termometara unutar zone odabiru se prema obliku same zone te na temelju iskustva jer ta mjesta nisu unaprijed određena. Neki od mogućih položaja termometara pokazani su na slici.



Slika 3. Prikaz mogućih položaja termometara

Osnovni podaci koji moraju biti poznati za izotermalni blok su:

- geometrija bloka
- smještaj bloka unutar radnog volumena kupke ili peći (mora biti naveden točan položaj, npr. u sredini, 20 mm od dna)
- dimenzije kupke ili peći (mjesto otvaranja, dubina)
- rupe koje su izostavljene iz procesa ispitivanja
- rupe koje se ne koriste za potrebe ispitivanja već samo za pozicioniranje i rukovanje blokom
- materijal pokrova gornje strane bloka (npr. od keramičke vune, polistirena ili drugih izolacijskih materijala)

4. KARAKTERIZACIJA IZOTERMALNE ZONE

Kako je već i naglašeno ne postoji standardna metoda za ispitivanje i karakterizaciju izotermalne zone koja se koristi u svakom laboratoriju, nego svaki laboratoriji koristi drugu metodu. Eksperimentalni dio ovog završnog rada napravljen je prema slovenskom članku „*Drnovšek J, Bojkovski J., Pušnik I.: A general procedure for evaluation of calibration baths in precision temperature measurements*“. Ne postoji način ispitivanja bez gradijenata i nehomogenosti unutar zone.

Vremenska promjena mjeriteljskih karakteristika temperature izotermalne zone, kao što su gradijenti i stabilnost, daju značajan doprinos ukupnom iznosu kalibracijske nesigurnosti. Stoga je precizna i točna procjena tih karakteristika iznimno važna.

4.1. Ispitne temperature

Ukoliko je zadan temperaturni raspon kupke, ispitivanje treba provesti na minimalno tri temperature:

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

Moguće je također i izabrati dodatne temperature unutar raspona kako bi stekao bolji uvid u zonu umjeravanja i dobili precizniji rezultati. Ukoliko je temperaturni raspon umjeravanja malen ili ako se zona koristi za određenu temperaturu, dovoljne su dvije ili jedna temperatura ispitivanja.

4.2. Homogenost temperature u radijalnom smjeru

Koriste se dva slična termometra, jedan se stavlja u referentnu rupu označenu s RR, a drugi u sljedeću rupu RX. Bilježe se rezultati i termometar se prebacuje u drugu rupu. Procedura se ponavlja za određeni broj mjerenja uspoređujući izabranu rupu s referentnom. Rezultat mjerenja se zabilježi te se nakon toga vrši zamjena mjesta termometara i ponavljanje mjerenja. Na ovaj način razlike između termometara T1 i T2 se ponište. Temperaturni gradijent između rupa RR i RX se računa prema formuli (5).

Referentna rupa može biti bilo koja rupa, ali se preporučuje izabrati rupu u sredini kupke. Parametar homogenosti temperature u radijalnom smjeru odražava kvalitetu izotermalne zone u pogledu smještaja grijača, cirkulacije zraka i izolacije. Pozitivni gradijent znači da je rupa RX na višoj temperaturi od rupe RR.

Za svaku ispitnu temperaturu mjere se podaci o radijalnoj temperaturi te se izračunaju gradijenti koji se prikazuju tablično ili dijagramski.

- radijalni temperaturni gradijenti

$$dt_x = t(RX) - t(RR) = \frac{[t(RX,T1)-t(RR,T2)]+[t(RX,T2)-t(RR,T1)]}{2} \quad (5)$$

- maksimalni radijalni gradijent temperature

$$dt_R = |maxdt_x|, x = 1, 2, \dots, n, n = \text{broj mjerenja} \quad (6)$$

- širina raspona radijalne nesigurnosti

$$a_{RG} = dt_R \quad (7)$$

- standardna nesigurnost

$$u_{RG} = \frac{1}{\sqrt{3}} a_{RG} \quad (8)$$

4.3. Homogenost temperature u aksijalnom smjeru

Koriste se dva slična termometra T1 i T2, jedan se stavlja u referentnu rupu RR, drugi u rupu RX. U početku su oba termometra uronjena do dna. Nakon zapisivanja temperature termometar T2 je podignut odozdo za određenu visinu.

Na svakom položaju se zapisuju očitavanja za oba termometra i izračunava se temperaturni gradijent. Sve izračunate temperaturne razlike između termometara T1 i T2 na svakoj visini se tada oduzimaju od početne razlike T1 i T2 na visini $h=0$.

Maksimalni temperaturni gradijent se određuje kao maksimalna razlika T2 na svim položajima u postupku mjerenja.

- aksijalni temperaturni gradijenti

$$dt_{H=i} = t(RX, T2)_{H=i} - t(RR, T1)_{H=0}$$

$$dt_{C,H=i} = dt_{H=i} - dt_{H=0} \quad (9)$$

- maksimalni aksijalni temperaturni gradijent

$$dt_A = |\max dt_{C,H=i}| \quad (10)$$

- širina raspona aksijalne homogenosti

$$a_{AG} = dt_A \quad (11)$$

- standardna nesigurnost

$$u_{AG} = \frac{1}{\sqrt{3}} a_{AG} \quad (12)$$

4.4. Stabilnost temperature

Termometar se postavlja u jednu od rupa RX, a može se odabrati i referenta rupa RR. Nakon što se zona umjeravanja dovede u stacionarno stanje, promatraju se i zapisuju oscilacije temperature u vremenskim intervalima od 30 minuta.

Stabilnost se izražava kao razlika najveće i najmanje zabilježene temperature u odabranom vremenskom periodu.

- stabilnost temperature nakon određenog vremenskog intervala

$$dt_s = |t_{max} - t_{min}| \quad (13)$$

- širina raspona temperaturne stabilnosti

$$a_{ST} = d_{TS} \quad (14)$$

- standardna nesigurnost

$$u_{ST} = \frac{1}{2\sqrt{3}} a_{ST} \quad (15)$$

4.4.1. Doprinos zoni nesigurnosti

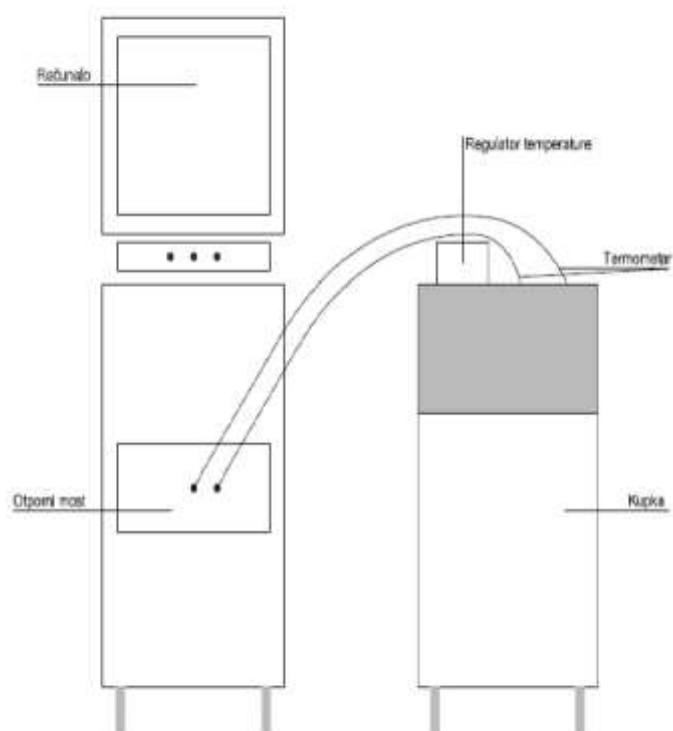
Za svaku ispitnu temperaturu kombinirani doprinos zone nesigurnosti, uključujući radijalne i aksijalne nesigurnosti i stabilnosti prema formuli:

$$U(T)_{k=1} = \sqrt{u_{RG}^2 + u_{AG}^2 + u_{TS}^2} \quad (16)$$

Rezultati dobiveni očitavanjem temperatura na jednom termometru uspoređuju se s rezultatima drugog. Zbog nemogućnosti provođenja mjerenja istovremeno, a poznato je da se uvjeti unutar kupke neprestano mijenjaju, potrebno je napraviti korekciju rezultata. Korekcija se provodi za skup mjerenja prilikom zamjene mjesta termometara. Korekcija izmjerene temperature može se prikazati i tablično i grafički.

5. POPIS OPREME

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



Slika 4. Prikaz mjerene linije

5.1. Fluidizirana kupka s pripadajućim izotermalnim blokom

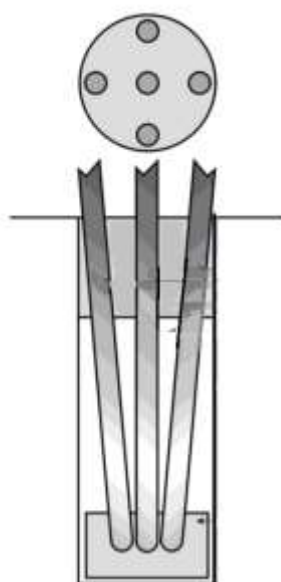


Slika 5. Fluidizirana kupka 875

Tablica 1. Tehnički podaci za kupku

Model:	875	
Temperaturno područje:	50 °C – 700 °C	
dimenzije:	visina	880 mm
	širina	580 mm
	dubina	640 mm
masa	85 kg	
materijal spremnika kupke	nehrđajući čelik	
radni volumen	promjer	67 mm
	dubina	457 mm
grijači	3 · 1 kW u paraleli	
napajanje	208 – 240 V, 50/60 Hz	

Fluidizirana kupka 875, kada se koristi kao usporedna kupka, s najnovijim dizajnom izotermalnog bloka u središtu. Nesigurnosti između $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ moguće su u temperaturnom rasponu od $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $700\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Slika 6. Shematski prikaz izotermalnog bloka

5.1.1. Protok zraka i aluminijev oksid

Kupka 875 sastoji se od posude u kojoj je prah aluminijeva oksida s poroznom pločom. Kroz ploču prolazi dovoljno zraka da se prah pretvori u stanje poput fluida. Tako će prah teći imajući dobre karakteristike prijenosa topline.

Tablica 2. Fizikalne veličine kupke

	Početna temperatura, $^{\circ}\text{C}$	Temperatura okoliša, $^{\circ}\text{C}$	Tlak bar	Protok zraka l/min	Minimalna količina aluminijev oksida
za kupke proizvedene nakon 1992.	200	20	10 - 15	20 - 30	2 kg

5.2. Termometri

Pri provedbi ispitivanja korišteni su termometri internih oznaka TEPOT19 i TEPOT21. Koriste se u području temperatura od -200 °C do 661 °C. Termometri se precizno testiraju na stabilnost za odgovarajuće temperature. Osjetljivi element je proizveden korištenjem platinske žice visoke čistoće. Za najpreciznija mjerenja se s termometrijskim otporničkim mostom povezuju pomoću četiri žice.



Slika 7. Platinski otpornički termometri

Tablica 3. 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

5.3. Oprema za mjerenje otpora termometra

Komponente sustava za mjerenje otpora, korištene u ovom ispitivanju su termometrijski otpornički most, multipleksor i fiksni otpornik.

5.3.1. Termometrijski otpornički most

ASL F700 (EOMOS03/03) je izabrani otpornički most za mjerenje otpora platinskih termometara. Može mjeriti otpore u području od 0.25Ω do 400Ω . Uređaj koji laboratorij koristi ima dva moguća ulaza za spajanje etalonskih otporničkih termometara, što može zadati probleme ukoliko se koristi više termometara prilikom ispitivanja. Međutim, spomenuti će se u nastavku i uređaj koji taj problem rješava.



Slika 8. Termometrijski otpornički most

Tablica 4. Tehnički podaci otporničkog mosta

Proizvođač	ASL	
Model	F700	
Napajanje	240/220/120/100 Vac	
Frekvencija	50 – 60 Hz	
Dimenzije	Visina	155 mm
	Širina	520 mm
	Dužina	466 mm
Masa	15 kg	
Radni uvjeti	0 °C – 30 °C, 10 % - 90 % RH	
Vrijeme mjerenja	10 sekundi za potpuni balans	
Linearnost	< ± 1 zadnja decimala (1 ppm)	
Točnost	0,25 mK puni raspon/ 6 mK do 1064 °C ovisno o otporu	

5.3.2. Multipleksor

ASL 158 (EOMOS03/01) je izabrani multipleksor koji omogućava proširenje mjernih mjesta na više kanala, a na svaki kanal je moguće spojiti po jedan otpornički termometar. Etalonski fiksni otpornik, proizvođača Tinsley (vrijednosti 100 Ω u kućištu) i multipleksor u kombinaciji s mostom omogućuju mjerenje otpora termometara.



Slika 9. Multipleksor sa spojenim termometrima

Tablica 5. 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	

5.3.3. Fiksni otpornik

Fiksni otpornik nominalnog otpora $100\ \Omega$ proizveden je postavljanjem vodiča od specijalne legure na nosače izrađene od materijala s malim dielektričnim gubicima i visokom mehaničkom stabilnošću. Zatim je sve zatvoreno hermetički u kućište od nehrđajućeg čelika, ispunjeno suhim uljem. Regulacija temperature otpornika ostvaruje se prikladnim termostatisanim kućištem.



Slika 10. Fiksni otpornik Tinsley 5685 A, $100\ \Omega$

5.4. Računalo

Pomoću računala je bio 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.

6. POSTUPAK ISPITIVANJA

Nakon provjere kupke i regulatora tlaka i temperature pali se kupka na početnu temperaturu 120 °C sat vremena. Zonu umjeravanja čini izotermalni blok svojom visinom i udaljenostima provrta.

Općeniti redoslijed ispitivanja:

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

6.1. Okolišni uvjeti

Tijekom cijelog postupka mjerenja i ispitivanja trebaju biti zadovoljeni određeni okolišni uvjeti kako bi mjerenje bilo valjano.

- 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.

6.2. Priprema mjerenja

Kako bi se s mjerenjem moglo krenuti, potrebno je:

- postaviti uređaje za mjerenje okolišnog stanja i pričekati dok se uređaji ne stacioniraju
- pregledati kupku u kojoj se provodi ispitivanje
- odrediti temperature na kojima se vrši ispitivanje
- skicirati prostorni raspored točaka unutar kupke u kojima će se provoditi ispitivanje
- pripremiti termometre i svu ostalo opremu potrebnu za rad

7. REZULTATI ISPITIVANJA

Ispitivanje kupke provedeno je na 200 °C, 400 °C, 500 °C i 600 °C. Rezultati su prikazani u tablicama i dijagramima.

7.1. Radijalna homogenost temperature

Tablica 6. Homogenost temperature u radijalnom smjeru – 200 °C

Temperatura ispitivanja – 200 °C					
Termometar T1 - TEPOT_19					
Termometar T2 - TEPOT_21					
T1	T2				u _{rad} , mK
H1	H2	H3	H4	H5	
198,743	198,748				2,9
198,808		198,82			6,9
198,805			198,800		2,9
198,841				198,828	7,5
max. vrijednost					7,5

Tablica 7. Homogenost temperature u radijalnom smjeru – 400 °C

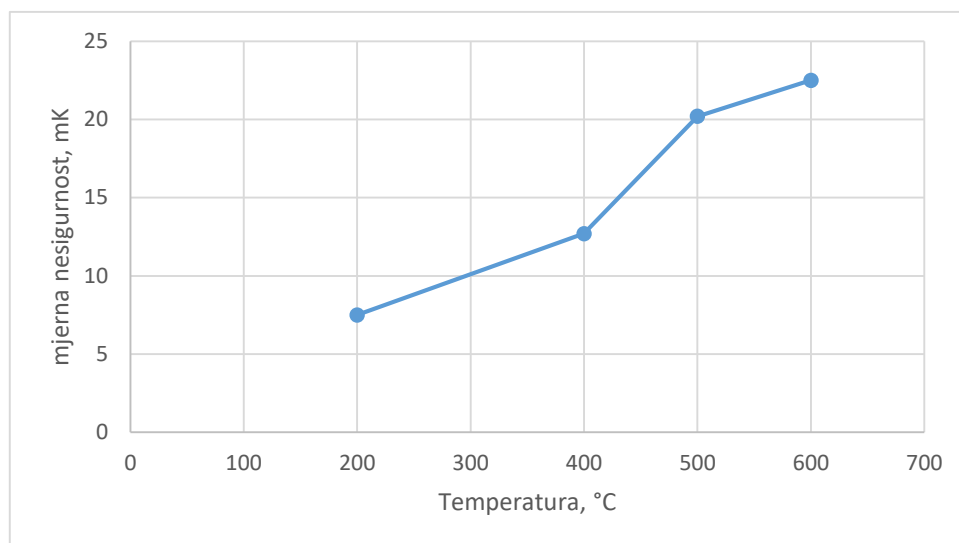
Temperatura ispitivanja – 400 °C					
Termometar T1 - TEPOT_19					
Termometar T2 - TEPOT_21					
T1	T2				u _{rad} , mK
H1	H2	H3	H4	H5	
398,327	398,347				11,5
398,316		398,301			8,7
398,341			398,319		12,7
398,331				398,346	8,7
max. vrijednost					12,7

Tablica 8. Homogenost temperature u radijalnom smjeru – 500 °C

Temperatura ispitivanja – 500 °C					
Termometar T1 - TEPOT_19					
Termometar T2 - TEPOT_21					
T1	T2				u _{rad} , mK
H1	H2	H3	H4	H5	
497,679	497,714				20,2
497,693		497,676			9,8
497,664			497,629		20,2
497,686				497,708	12,7
max. vrijednost					20,2

Tablica 9. Homogenost temperature u radijalnom smjeru – 600 °C

Temperatura ispitivanja – 600 C					
Termometar T1 - TEPOT_19					
Termometar T2 - TEPOT_21					
T1	T2				u _{rad} , mK
H1	H2	H3	H4	H5	
597,026	597,063				21,4
596,523		596,489			19,6
597,266			597,227		22,5
597,328				597,366	21,9
max. vrijednost					22,5



Slika 11. Mjerna nesigurnost zbog radialne nehomogenosti

7.2. Aksijalna homogenost temperature

Kako bi se utvrdila najveća dubina uranjanja termometara u izotermalni blok fluidizirane kupke, pri kojoj je izmjerena vrijednost aksijalne nehomogenosti prihvatljiva, prvo ispitivanje (u temperaturnoj točki 200 °C) provedeno je od dubine uranjanja 500 mm ($h=0$ mm) do dubine uranjanja od 300 mm ($h=200$ mm), s koracima od 20 mm. Budući da očekivani doprinos kupke ukupnoj nesigurnosti umjeravanja termometara iznosi okvirno 100 mK, zaključeno je da su iznosi izmjerenih aksijalnih gradijenata prihvatljivi za vertikalne udaljenosti termometara od dna izotermalnog bloka ($h=0$ mm) do visine od $h=60$ mm. Iz ovog razloga, aksijalni gradijenti u svim ostalim temperaturnim točkama određeni su do udaljenosti termometara od $h=60$ mm u odnosu na dno izotermalnog bloka. Također, za izračun nesigurnosti zbog aksijalnih gradijenata u temperaturnoj točki 200 °C korištene su vrijednosti za raspon visina od $h=0$ do $h=60$ mm, zbog čega je i maksimalna vrijednost aksijalnih gradijenata u Tablici 10 dana do visine $h=60$ mm. Izmjerene vrijednosti koje nisu uzete u obzir prilikom izračuna nesigurnosti zbog aksijalnih gradijenata u Tablici 10 su označene sivom bojom.

Tablica 10. Homogenost temperature u aksijalnom smjeru – 200 °C

Temperatura ispitivanja – 200 °C									
Termometar T1 - TEPOT_19 – H5									
Termometar T2 - TEPOT_21 – H1									
T2	T1								
h=0 (mm)	h=0	h=20	h=40	h=60	h=80	h=120	h=160	h=200	u _{aks} , mK
198,882	198,883								
198,887		198,863							14,4
198,893			198,854						23,1
198,961				198,864					56,6
198,888					198,737				87,8
198,894						198,720			101,2
198,8912							198,5786		181,1
198,8798								198,1345	430,9
max. vrijednost									56,6

Tablica 11. Homogenost temperature u aksijalnom smjeru – 400 °C

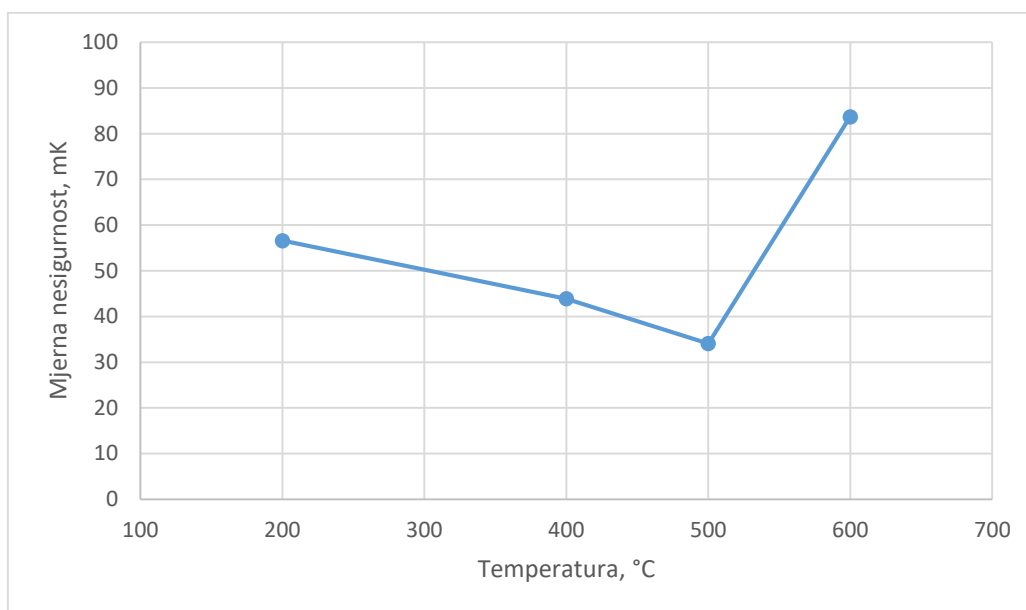
Temperatura ispitivanja – 400 °C					
Termometar T1 - TEPOT_19 – H5					
Termometar T1 - TEPOT_21 – H1					
T2	T1				
h=0	h=0	h=20	h=40	h=60	u _{aks} , mK
398,346	398,367				
398,322		398,326			9,8
398,349			398,328		24,2
398,346				398,291	43,9
max. vrijednost					43,9

Tablica 12. Homogenost temperature u aksijalnom smjeru – 500 °C

Temperatura ispitivanja – 500 °C					
Termometar T1 - TEPOT_19 – H5					
Termometar T1 - TEPOT_21 – H1					
T2	T1				
h=0	h=0	h=20	h=40	h=60	u _{aks} , mK
497,649	497,678				
497,694		497,711			6,9
497,719			497,696		30,0
497,706				497,676	34,1
max. vrijednost					34,1

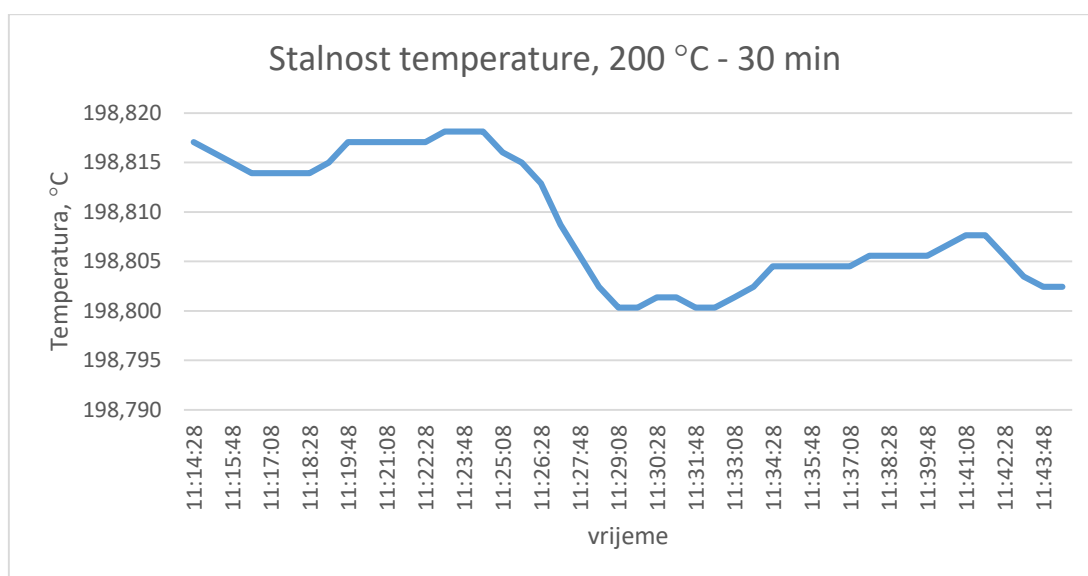
Tablica 13. Homogenost temperature u aksijalnom smjeru – 600 °C

Temperatura ispitivanja – 600 °C					
Termometar T2 - TEPOT_19 – H5					
Termometar T2 - TEPOT_21 – H1					
T2	T1				
h=0	h=0	h=20	h=40	h=60	u _{aks} ,mK
597,258	597,313				
597,372		597,400			15,6
597,317			597,314		33,5
597,275				597,185	83,7
max. vrijednost					83,7

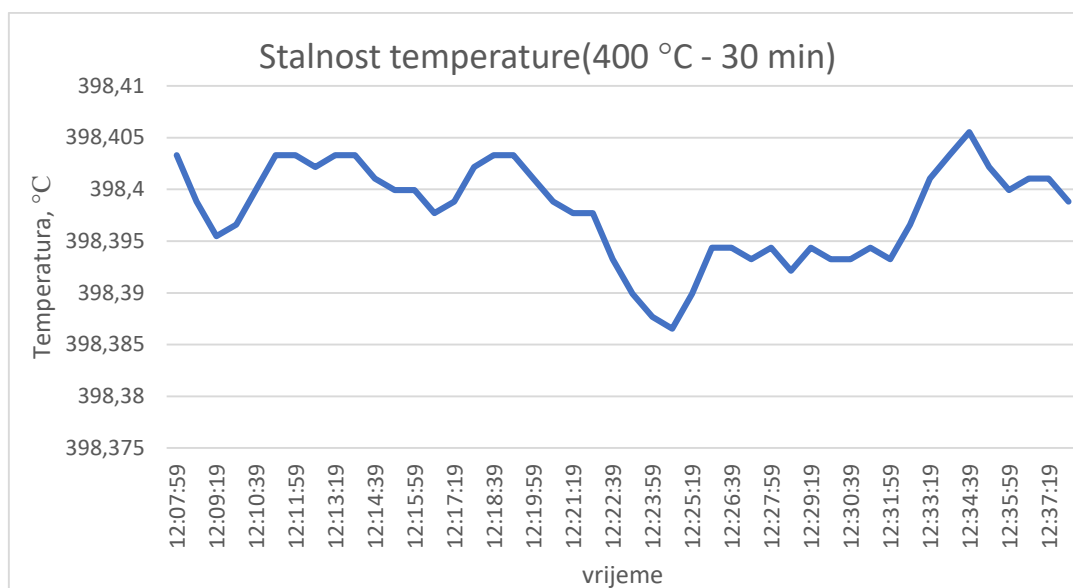


Slika 12. Mjerna nesigurnost zbog aksijalne nehomogenosti

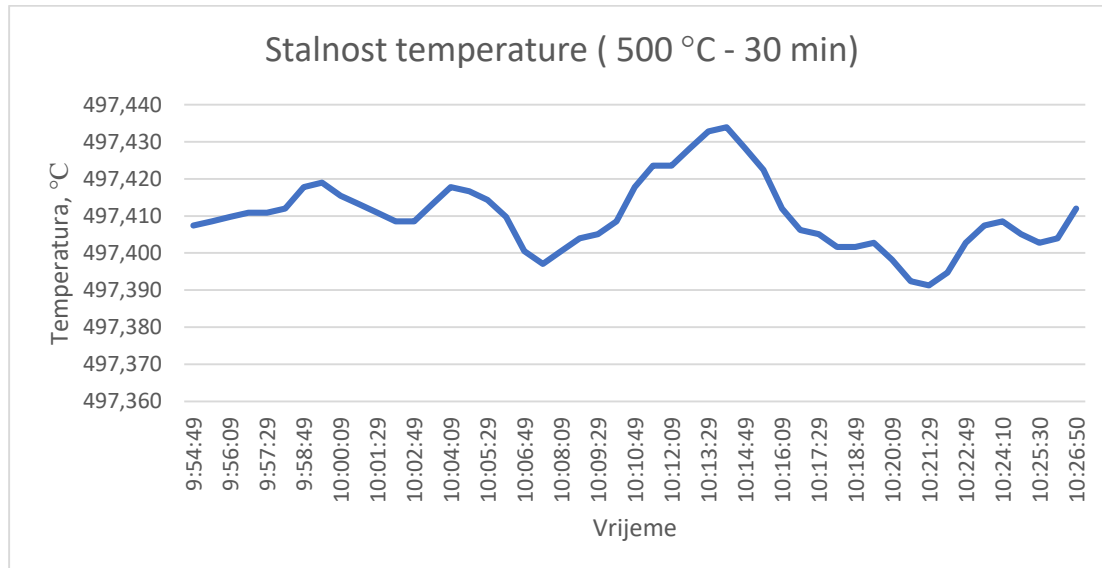
7.3. Stalnost temperature



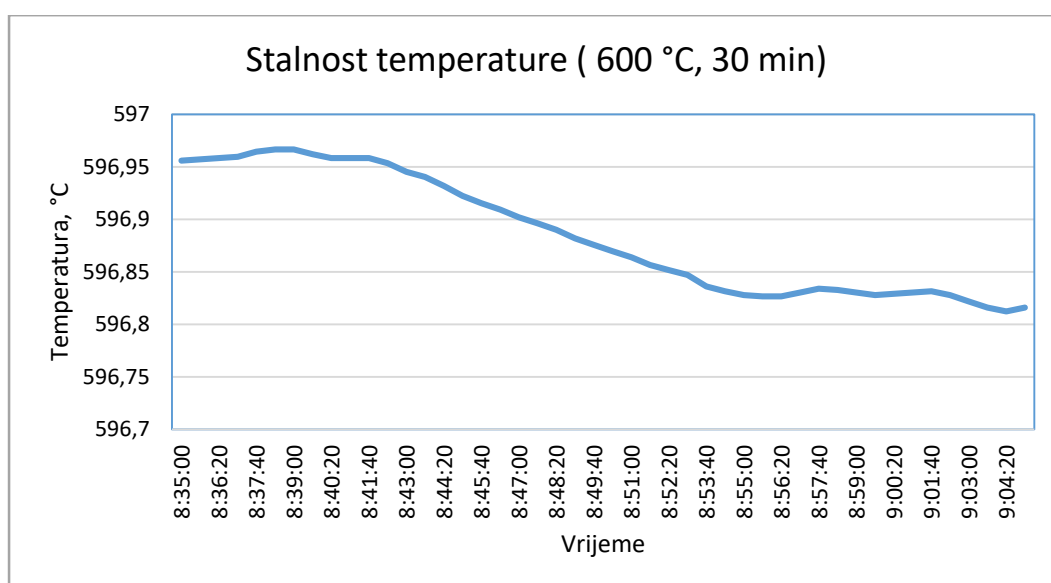
Slika 13. 30 minutna stalnost temperature pri 200 °C



Slika 14. 30 minutna stalnost temperature pri 400 °C



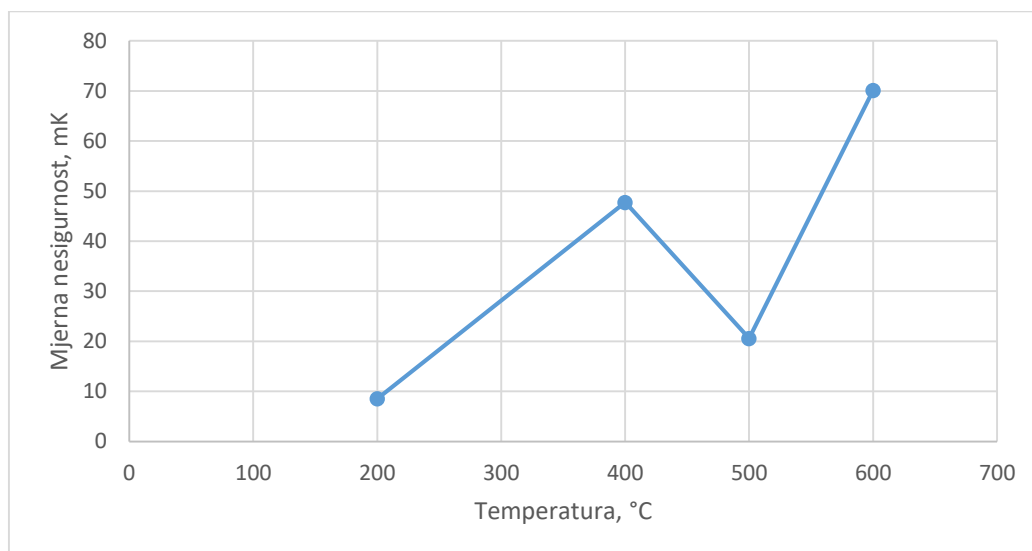
Slika 15. 30 minutna stalnost temperature pri 500 °C



Slika 16. 30 minutna stabilnost pri 600 °C

Tablica 14. Mjerna nesigurnost stalnosti temperature

Ispitna temperatura, °C	a, mK	u, mK
200	9,9	8,5
400	55,1	47,7
500	23,8	20,6
600	81,8	70,1
max.vrijednost	81,8	70,1



Slika 17. Mjerna nesigurnost stalnosti temperature

Tablica 15. Ukupna mjerna nesigurnost (200 °C)

Ispitna temperatura, °C	200 °C		
	Distribucija	a, mK	u, mK
Izvor nesigurnosti			
Radijalni gradijenti	pravokutna	13	7,5
Aksijalni gradijenti	pravokutna	98,0	56,6
Stalnost temperature	pravokutna	14,8	8,5
Kombinirana nesigurnost	k=1	99,9	57,7
Proširena nesigurnost	k=2	199,9	115,4

Tablica 16. Ukupna mjerna nesigurnost (400 °C)

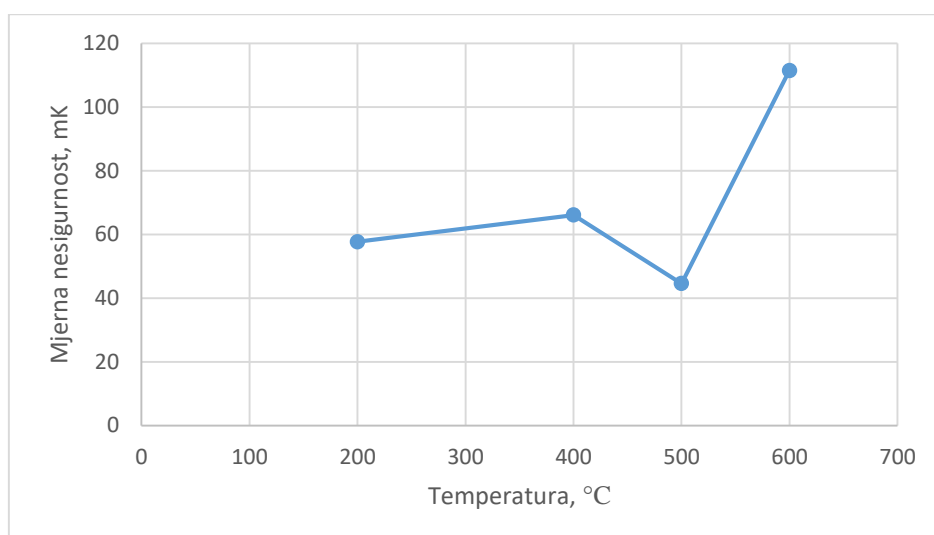
Ispitna temperatura, °C	400 °C		
Izvor nesigurnosti	Distribucija	a, mK	u, mK
Radijalni gradijenti	pravokutna	22	12,7
Aksijalni gradijenti	pravokutna	76	43,9
Stalnost temperature	pravokutna	82,7	47,7
Kombinirana nesigurnost	k=1	114,4	66,1
Proširena nesigurnost	k=2	228,9	132,1

Tablica 17. Ukupna mjerna nesigurnost (500 °C)

Ispitna temperatura, °C	500 °C		
Izvor nesigurnosti	Distribucija	a, mK	u, mK
Radijalni gradijenti	pravokutna	35	20,2
Aksijalni gradijenti	pravokutna	59	34,1
Stalnost temperature	pravokutna	35,6	20,6
Kombinirana nesigurnost	k=1	77,3	44,6
Proširena nesigurnost	k=2	154,6	89,3

Tablica 18. Ukupna mjerna nesigurnost (600 °C)

Ispitna temperatura, °C	600 °C		
Izvor nesigurnosti	Distribucija	a, mK	u, mK
Radijalni gradijenti	Pravokutna	39	22,5
Aksijalni gradijenti	Pravokutna	145	83,7
Stalnost temperature	Pravokutna	121,4	70,1
Kombinirana nesigurnost	k=1	193,1	111,4
Proširena nesigurnost	k=2	386,2	222,9

**Slika 18. Ukupna mjerna nesigurnost**

8. ZAKLJUČAK

Ispitivanje kupke se provodi da se utvrde njena svojstva i ponašanje u zadanim uvjetima, kako bi se što pouzdanije mogla koristiti za umjeravanje termometara. Ispitivanje je uspješno provedeno na četiri ispitne temperature: 200 °C, 400 °C, 500 °C i 600 °C u Laboratoriju za procesna mjerenja (LPM) na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Svrha ispitivanja je bila utvrditi temperaturnu homogenost i stalnost temperature unutar radnog volumena kupke.

Utvrđeni doprinos nesigurnosti kupke ukupnoj mjernoj nesigurnosti umjeravanja termometra iznosi 57,7 mK na temperaturi 200 °C, 66,1 mK na temperaturi 400 °C, 44,6 mK na temperaturi 500 °C i 111,4 mK na temperaturi 600 °C. Analizom rezultata vidljivo je ukupna mjerna nesigurnost najveća za 600 °C, a najveći doprinos imaju aksijalni gradijenti koji su prihvatljivi za vertikalne udaljenosti termometara od dna izotermalnog bloka ($h=0$ mm) do visine od $h=60$ mm.

Podaci iskazani u ovom radu koristiti će se u svakodnevnom radu laboratorija za procjenu mjerne nesigurnosti prilikom umjeravanja 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] Testing of isothermal zones, Laboratorij za procesna mjerenja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2003.
- [3] Šestan, D., Jugović A.: Evaluation of calibration baths with two precision thermometers, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [4] <https://isotech.co.uk/products/fluidized-furnace-model-875/> (posjet 15.2.2021.)

PRILOZI

I. CD-R disc