

Ispitivanje termometrijske komore

Benc, Martina

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

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:235:818465>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Martina Benc

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

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

Student:

Martina Benc

Zagreb, 2018.

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

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Davoru Zvizdiću na ukazanom strpljenju, dr. sc. Danijelu Šestanu na pomoći prilikom izrade rada te ostalim djelatnicima Laboratorija za procesna mjerenja.

Martina Benc



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Martina Benc**

Mat. br.: 0035193251

Naslov rada na
hrvatskom jeziku: **Ispitivanje termometrijske komore**

Naslov rada na
engleskom jeziku: **Testing of thermometric chamber**

Opis zadatka:

Potrebno je definirati i provesti postupak ispitivanja termometrijske komore u području od -20°C do 70°C . Postupak treba obuhvatiti određivanje prostornih temperaturnih gradijenata, stalnosti temperature i dinamike zagrijavanja. U navedenoj komori će se provoditi usporedbeno umjeravanje termometara te je temperaturne gradijente i stalnost temperature potrebno definirati kao sastavnice koje doprinose procjeni ukupne mjerne nesigurnosti umjeravanja. Za ispitivanje će se koristiti postojeće mjerne linije u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje (FSB-LPM). Potrebno je:

- Izraditi pregled teorijskih osnova za ispitivanja termometrijskih komora.
- Opisati postupak za procjenu mjerne nesigurnosti, kako samog ispitivanja tako i utjecaja rezultata na ukupnu mjernu nesigurnost usporedbenog umjeravanja termometara.
- Definirati ispitni postupak za ispitivanje i karakterizaciju termometrijske komore, što uključuje utvrđivanje horizontalnih i vertikalnih gradijenata temperature, stalnosti i dinamike zagrijavanja.
- Sastaviti mjernu liniju za ispitivanje koristeći postojeće uređaje i pomoćnu opremu koja je na raspolaganju u FSB-LPM. Dati opis sheme spajanja ispitnog sustava sa pomoćnim uređajima.
- Izraditi opis postupka ispitivanja.
- Priložiti primjere u obliku rezultata ispitivanja sa procijenjenim doprinosima zona ukupnoj mjernoj nesigurnosti usporedbenog umjeravanja.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Rok predaje rada:

1. rok: 23. veljače 2018.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.

3. rok: 21. rujna 2018.

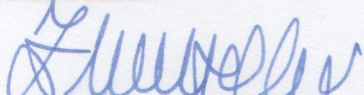
Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26.2. - 02.03. 2018.

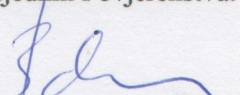
2. rok (izvanredni): 2. 07. 2018.

3. rok: 24.9. - 28. 09. 2018.

Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Davor Zvizdić

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	IV
POPIS DIJAGRAMA	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD	1
2. TEORIJSKE OSNOVE	2
2.1. Temperatura	2
2.2. Mjerenje temperature	2
2.2.1. Mjerenje temperature otpornim uređajima	3
2.3. Umjeravanje	3
2.3.1. Usporedbeno umjeravanje termometara	4
2.4. Osnove ispitivanja termometrijske komore	4
2.4.1. Zahtjevi na komore	4
2.4.2. Metode ispitivanja komore	5
2.4.2.1. Metoda A	5
2.4.2.2. Metoda B	5
2.4.2.3. Metoda C	6
3. PROCJENA MJERNE NESIGURNOSTI	7
3.1. Mjerna nesigurnost	7
3.2. Pogreške kod mjerenja	7
3.2.1. Sustavne pogreške	8
3.2.2. Slučajne pogreške	8
3.3. Izračun mjerne nesigurnosti	8
3.3.1. Izračun pojedinačne mjerne nesigurnosti	8
3.3.1.1. Procjene tipa A	8
3.3.1.2. Procjene tipa B	10
3.3.2. Izračun kombinirane mjerne nesigurnosti	10
3.4. Doprinosi mjernoj nesigurnosti	11
3.4.1. Prostorni temperaturni gradijent	11
3.4.2. Vremenska nestabilnost	12
3.4.3. Utjecaj zračenja	12
3.5. Ukupna standardna nesigurnost	13
4. ISPITNI POSTUPCI	15
4.1. Raspored mjernih lokacija	15
4.1.1. Metoda A i B	15
4.1.2. Metoda C	15
4.2. Određivanje prostornih gradijenata	15
4.3. Određivanje vremenske nestabilnosti	16

4.4. Određivanje dinamike zagrijavanja	16
5. UMJERAVANJE TERMOMETARA	17
5.1. Opis postupka umjeravanja termometara	17
5.2. Mjerna oprema i uređaji korišteni pri umjeravanju termometara	17
5.2.1. Etalonski termometar	17
5.2.2. Etalonski termometrijski otpornički most	19
5.2.3. Termometrijske kupke	19
5.2.4. Umjeravani termometri	20
5.2.5. Računalo	20
6. ISPITIVANJE KOMORE U LPM	26
6.1. Shema ispitnog sustava	26
6.2. Mjerni uređaji i oprema korišteni pri ispitivanju komore	26
6.2.1. Ispitivana komora	26
6.2.2. Etalonski termometrijski otpornički most	27
6.2.3. Etalonski otpornik u grijanom kućištu	28
6.2.4. Računalo	28
6.3. Opis postupka ispitivanja	29
7. REZULTATI ISPITIVANJA KOMORE	31
7.1. Rezultati ispitivanja dinamike zagrijavanja	31
7.2. Izračun doprinosa ukupnoj mjernoj nesigurnosti	33
8. ZAKLJUČAK	38
LITERATURA	39
PRILOZI	40

POPIS SLIKA

Slika 1.	Gaussova raspodjela	9
Slika 2.	Pravokutna raspodjela	10
Slika 3.	Etalonski termometar	18
Slika 4.	Etalonski termometrijski otpornički most	19
Slika 5.	Kupka (TEKUP11).....	20
Slika 6.	Kupka (TEKUP01).....	20
Slika 7.	Shema ispitnog sustava.....	26
Slika 8.	Termometrijska komora	27
Slika 9.	Etalonski termometrijski otpornički most	28
Slika 10.	Etalonski otpornik u grijanom kućištu	28
Slika 11.	Smještaj termometara u komori	30

POPIS TABLICA

Tablica 1. Karakteristike etalonskog termometra.....	18
Tablica 2. Karakteristike etalonskog termometrijskog most	19
Tablica 3. Karakteristike termometrijskih kupki.....	19
Tablica 4. Karakteristike otporničkih termometara.....	20
Tablica 5. Rezultati umjeravanja termometara na -20 °C, a	21
Tablica 6. Rezultati umjeravanja termometara na -20 °C, b.....	21
Tablica 7. Rezultati umjeravanja termometara na 0 °C, a	22
Tablica 8. Rezultati umjeravanja termometara na 0 °C, b	22
Tablica 9. Rezultati umjeravanja termometara na 25 °C, a	23
Tablica 10. Rezultati umjeravanja termometara na 25 °C, b	23
Tablica 11. Rezultati umjeravanja termometara na 50 °C, a	24
Tablica 12. Rezultati umjeravanja termometara na 50 °C, b	24
Tablica 13. Rezultati umjeravanja termometara na 70 °C, a	25
Tablica 14. Rezultati umjeravanja termometara na 70 °C, b	25
Tablica 15. Karakteristike komore	26
Tablica 16. Rezultati ispitivanja komore pri -20 °C	33
Tablica 17. Izračun ukupne mjerne nesigurnosti pri -20 °C.....	33
Tablica 18. Rezultati ispitivanja komore pri 0 °C.....	34
Tablica 19. Izračun ukupne mjerne nesigurnosti pri 0 °C.....	34
Tablica 20. Rezultati ispitivanja komore pri 25 °C.....	35
Tablica 21. Izračun ukupne mjerne nesigurnosti pri 25 °C.....	35
Tablica 22. Rezultati ispitivanja komore pri 50 °C.....	36
Tablica 23. Izračun ukupne mjerne nesigurnosti pri 50 °C.....	36
Tablica 24. Rezultati ispitivanja komore pri 70 °C.....	37
Tablica 25. Izračun ukupne mjerne nesigurnosti pri 70 °C.....	37
Tablica 26. Izmjerene vrijednosti temperature pri -20 °C	40
Tablica 27. Izmjerene vrijednosti temperature pri 0 °C.....	41
Tablica 28. Izmjerene vrijednosti temperature pri 25 °C.....	42
Tablica 29. Izmjerene vrijednosti temperature pri 50 °C.....	43
Tablica 30. Izmjerene vrijednosti temperature pri 70 °C.....	44

POPIS DIJAGRAMA

Dijagram 1.	Ispitivanje dinamike zagrijavanja od -20 °C do 0 °C.....	31
Dijagram 2.	Ispitivanje dinamike zagrijavanja od 25 °C do -20 °C.....	31
Dijagram 3.	Ispitivanje dinamike zagrijavanja od 25 °C do 50 °C	32
Dijagram 4.	Ispitivanje dinamike zagrijavanja od 50 °C do 70 °C	32

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$\bar{X}$	-	srednja vrijednost
s	-	standardna devijacija
u_A	mK	standardna nesigurnost tipa A
u_B	mK	standardna nesigurnost tipa B
a	-	poluinterval sigurnosti
U	mK	proširena mjerna nesigurnost
k	-	faktor pokrivanja
$t_{sr}(i)$	°C	srednja temperatura i-tog termometra
t	°C	temperatura
Δt_{ref}	°C	gradijent između referentne točke te jedne od mjernih lokacija
δt_{nehom}	°C	prostorna nehomogenost
δt_{zr}	°C	utjecaj zračenja
$grad\ \vartheta$	°C	temperaturni gradijent
Δt_{reg}	°C	odstupanje regulatora temperature komore
t_{ref}	°C	srednja vrijednost očitavanja termometra u referentnoj točki
δt_{ref}	°C	Odstupanje referentnog termometra
δt_{drift}	°C	klizanje termometara
t_{kom}	°C	vrijednost temperature postavljene na regulatoru komore
δt_{rez}	°C	rezolucija namještanja temperature u komori
δt_{stab}	°C	stabilnost temperature u komori

SAŽETAK

Glavni zadatak ovoga rada bio je ispitati termometrijsku komoru za temperaturno područje od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ispitivanje se odvijalo na pet različitih temperatura, a to su: $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ te $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Postupak ispitivanja obuhvatio je određivanje prostornih temperaturnih gradijenata (prostorne nehomogenosti), vremenske nestabilnosti te dinamike zagrijavanja. Također je određen pojedini doprinos zona ukupnoj mjernoj nesigurnosti umjeravanja termometara. Osim ispitivanja komore odrađeno je i umjeravanje otporničkih termometara u kupkama.

Ključne riječi: prostorna nehomogenost, vremenska nestabilnost, umjeravanje, mjerna nesigurnost

SUMMARY

The main task of this thesis was to test the thermometric chamber for the temperature range from -20 °C do 70 °C. Testing took place at five different temperatures, which are: -20 °C, 0°C, 25 °C, 50 °C and 70 °C. The calibration procedures included determination of the spatial temperature gradients (spatial inhomogeneity), temporal instability and the heating rate. Individual contributions to the overall measurement uncertainty of thermometers calibration were also determined. Beside the testing of the chamber, calibration of the resistance thermometers was done.

Key words: spatial inhomogeneity, temporal instability, calibration, measurement uncertainty

1. UVOD

Tema ovoga rada je ispitivanje karakteristika termometrijske komore koje utječu na ukupnu mjernu nesigurnost umjeravanja termometara.

Termometrijska komora je objekt u kojem možemo ostvariti odabranu vrijednost temperature u zatvorenom volumenu u određenom radnom području. U komori je definiran koristan volumen određen mjernim lokacijama. Može biti stacionarna ili pomična.

Mjerna lokacija je mjesto unutar korisnog volumena u kojem su postavljeni temperaturni senzori. Zapravo predstavlja volumen definiran dimenzijama senzora.

Koristan volumen je dio volumena komore koji je određen mjernim lokacijama u kojima se nalaze senzori za ispitivanje. Ovisno o rasporedu mjernih lokacija, koristan volumen se može znatno razlikovati od ukupnog volumena komore. Rezultati dobiveni ispitivanjem važeći su samo za koristan volumen.

Osim ispitivanja komore, radilo se i umjeravanje termometara koji su korišteni tokom njezinog ispitivanja. Umjeravanje termometara odvijalo se u dvjema kupkama, zbog različitog raspona ispitnih temperatura. Ispitivanje termometrijske komore se odrađivalo za pet ispitnih temperatura koje se nalaze u temperaturnom području od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Umjeravanje termometara se također odvijalo na istim temperaturama.

Dobiveni rezultati ispitivanja nam daju uvid u ukupnu mjernu nesigurnost umjeravanja termometara te se mogu koristiti prilikom budućih umjeravanja.

2. TEORIJSKE OSNOVE

2.1. Temperatura

Za temperaturu možemo reći da predstavlja mjeru zagrijanosti (ohlađenosti) nekog tijela ili sustava, ali to nam ne daje pravu definiciju temperature jer je subjektivno tvrditi da je nešto toplo, odnosno hladno. Temperatura je toplinsko stanje tijela ili sustava te ovisi o tome koliko topline sadrži tijelo određene mase. Kada određujemo toplinu nekog tijela ili procesa, glavna veličina koja se mjeri je upravo temperatura.

Temperatura je veličina sustava koja se ne može mjeriti direktno, nego usporedbom s nekom drugom mjerljivom veličinom. Najčešće ju uspoređujemo s visinom stupca žive kod živinog termometra. Pri dovođenju živinog termometra u dodir s promatranim tijelom, u određenim uvjetima, tijekom nekog vremena uočavamo promjenu stupca žive. Kada više ne uočavamo značajnu promjenu mjerene veličine, možemo reći da je postignuta toplinska ravnoteža, odnosno da su temperature u sustavu jednake. O tome nam govori nulti zakon termodinamike, prema kojem svaki sustav prepušten sam sebi prirodno teži postizanju ravnoteže, te kada je ona postignuta, sve mjerljive veličine u sustavu nestaju.

2.2. Mjerenje temperature

Pošto temperatura nije aditivna veličina, nego se mjeri usporedbom s nekom drugom mjerljivom veličinom, za temperaturu jer potrebno ustanoviti fiksne referentne točke, kao što su ledište ili vrelište neke tvari, pri kojima je jasno definiran prijelaz između krutog, kapljevito i plinovito stanje. Fiksne referentne točke definirane su prema Međunarodnoj temperaturnoj skali (ITS-International Practical Temperature Scale). Neke od tih točaka su:

- Trojna točka ravnotežnog vodika ($-259,34\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Vrelište kisika ($-182,962\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Vrelište vode ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Ledište srebra ($961,93\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Ledište cinka ($419,58\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Ledište zlata ($1064,43\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Sve temperature su definirane za standardni atmosferski tlak.

Instrumenti za mjerenje temperature mogu se podijeliti u grupe, u ovisnosti o principu njihovog djelovanja. Neki od glavnih principa su:

- Termoelektrični efekt
- Promjena otpora
- Toplinsko širenje
- Promjena boje
- Promjena stanja materijala

2.2.1. Mjerenje temperature otpornim uređajima

Kod ovakvih uređaja, prilikom promjene temperature, dolazi do promjene otpora. Mogu se podijeliti na otporne termometre i termistore, ovisno o tome jesu li na načinjeni od metala ili poluvodiča.

Termistori su načinjeni od krutih poluvodiča koji imaju veliki negativni temperaturni koeficijent otpora (s porastom temperature otpor pada). Materijali koji se koriste za njihovu proizvodnju su: nikal, bakar, kobalt, željezo, cink, aluminij, magnezij.

Kod otpornog termometra mjerni osjetnik je najčešće zavojnica malog promjera, izrađena od platine, nikla, bakra ili nekog drugog metala. Najčešće se koristi platina, a nakon nje i nikal zbog toga što posjeduju veliku i stabilnu vrijednost temperaturnog koeficijenta otpora, te se lako dobivaju kao visoko čisti materijali. U usporedbi s platinom, bakar i nikal su osjetljiviji na oksidaciju i koroziju, što znatno ograničava njihovu točnost i trajnost. Za mjerenje temperature otpornim termometrima mogu se koristiti uobičajene metode, metoda otklona ili metoda kompenzacije.

2.3. Umjeravanje

Umjeravanje je znanost točnog prenošenja neke fizikalne veličine od etalona do nepoznatog mjerila. Etaloni su certificirani uređaji visoke točnosti, koje koristimo za umjeravanje. Umjeravanje se sastoji od usporedbe izlaza koje pokazuje ispitivani instrument i izlaza etalona, nakon što su oba uređaja podvrgnuta jednakom ulazu (mjernoj količini). Postupak se provodi za cijeli mjerni raspon uređaja za mjerenje.

Umjeravanjem nam je osigurana točnost pokazivanja instrumenata pod uvjetom da se koriste u jednakim okolišnim uvjetima u kojima se umjeravanje odvijalo. Ako se instrumenti

koristeu drugačijim okolišnim uvjetima, potrebno je izvršiti korekciju mjernih rezultata te dati procjenu mjerne nesigurnosti.

Umjeravanje uređaja se treba ponoviti nakon određenog vremenskog intervala zbog promjene karakteristika uređaja. Do promjena karakteristika može doći zbog mehaničkog trošenja, utjecaja prašine, kemikalija itd.

2.3.1. Usporedbeno umjeravanje termometara

Usporedbeno umjeravanje termometara je usporedba umjeravanog termometra s etalonskim u zoni kontrolirane temperature. Nakon njihovog postavljanja u zonu kontrolirane temperature i uspostavljanja toplinske ravnoteže, tj. kada su se očitavanja ustalila, vrši se određen broj očitavanja. Vrijednosti koje očitavamo su vrijednosti otpora, pomoću kojih interpolacijom računamo temperaturu u zoni. Postupak se ponavlja za sve temperaturne točke u zoni, nakon čega možemo izračunati koeficijente za polinom koji koristimo pri interpolaciji.

2.4. Osnove ispitivanja termometrijske komore

2.4.1. Zahtjevi na komore

Kako bi klimatska komora mogla biti ispitana, treba zadovoljiti slijedeće zahtjeve:

- Trebaju biti dostupni senzori za mjerenje temperature s pripadajućim pokazateljima kao sastavni dijelovi komore.
- Moraju postojati kontrolni sustavi za vrijednosti koje se ispituju kao dijelovi komore.
- Mora biti dostupna tehnička dokumentacija od strane proizvođača.
- Trebaju postojati tehnički podaci o kategoriji senzora, kao što su na primjer pozicija i karakteristike senzora.
- U komori treba vladati atmosferski tlak (treba biti osigurana mogućnost izjednačavanja tlaka u komori s okolišnim).
- Za određeno temperaturno područje rada komore, ispitivanje je potrebno provesti za najmanje tri temperature. Ispitivanje na samo jednoj temperaturi je moguće, ali se rezultat odnosi samo na tu radnu točku te to mora biti navedeno u potvrdi o ispitivanju.
- Ako dolazi do pojave toplinskih gubitaka unutar korisnog volumena, taj utjecaj se mora odrediti u okviru doprinosa mjernoj nesigurnosti zbog utjecaja punjenja.

2.4.2. Metode ispitivanja komore

Ispitivanje komore može se provoditi na tri različite metode.

2.4.2.1. Metoda A

Ispitivanje prema ovoj metodi se odnosi na koristan volumen određen mjernim lokacijama u nenapunjenoj komori.

Ispitivanje pokriva:

- određivanje razlike između referentne mjerne lokacije i pokazivanja komore
- određivanje prostorne nehomogenosti unutar praznog korisnog volumena
- određivanje vremenske nestabilnosti unutar praznog korisnog volumena
- određivanje utjecaja zračenja
- na zahtjev korisnika, određivanje utjecaja punjenja usporedbom mjerenja u napunjenom i praznom korisnom prostoru za određenu mjernu lokaciju

2.4.2.2. Metoda B

Ispitivanje se odnosi na koristan volumen obuhvaćen mjernim lokacijama unutar napunjene komore. Punjenje komore se može izvršiti prema korisnikovom uobičajenom načinu punjenja komore ili punjenjem najmanje 40% korisnog volumena testnim tijelima. Za određivanje mjernih nesigurnosti vrijede ista pravila kao i za metodu A. Utjecaj samog punjenja određuje se dodatnim mjerenjem u središnjoj mjernoj lokaciji u praznom stanju. Umjeravanje je znanost točnog prenošenja neke fizikalne veličine od etalona do nepoznatog mjerila.

Ispitivanje obuhvaća:

- određivanje korekcije pokazivanja komore, odnosno razlike između vrijednosti izmjerene u referentnoj lokaciji i pokazivanja komore, u napunjenom stanju
- određivanje prostorne nehomogenosti u napunjenom korisnom volumenu
- određivanje vremenske nestabilnosti u napunjenom korisnom volumenu
- određivanje utjecaja zračenja
- određivanje utjecaja punjenja usporedbom mjerenja napunjenog i praznog prostora za referentnu mjernu lokaciju

2.4.2.3. Metoda C

Ispitivanje se odnosi na pojedinačne mjerne lokacije unutar komore, koje ne definiraju koristan volumen.

Ispitivanje obuhvaća:

- određivanje korekcije pokazivanja komore, odnosno razlike između vrijednosti izmjerene u pojedinoj mjernoj lokaciji i pokazivanja komore
- određivanje vremenske nestabilnosti u mjernoj lokaciji
- određivanje utjecaja zračenja u mjernoj lokaciji
- na zahtjev korisnika, određivanje utjecaja punjenja usporedbom mjerenja u mjernoj lokaciji napunjenog i praznog korisnog volumena

3. PROCJENA MJERNE NESIGURNOSTI

3.1. Mjerna nesigurnost

Niti jedno mjerenje nije potpuno precizno, što znači da ne možemo biti potpuno sigurni u rezultate naših mjerenja. Zbog toga se pri svakom mjerenju javlja sumnja u rezultat, koja predstavlja mjernu nesigurnost.

Mjerna nesigurnost je parametar pridružen mjernom rezultatu, koji označava rasipanje vrijednosti, što se smije razborito pripisati mjerenoj veličini.

Nesigurnost nije jednaka pogrešci mjerenja. Pogreška je razlika između izmjerene i stvarne vrijednosti, dok je nesigurnost kvantifikacija sumnje u rezultat mjerenja.

Kako bismo mjernu nesigurnost kvantificirali potrebno je znati interval nesigurnosti te nivo pouzdanosti. Interval predstavlja gornju i donju granicu odstupanja, a nivo pouzdanosti nam govori koliko smo sigurni da se stvarna vrijednosti nalazi u tom intervalu.

3.2. Pogreške kod mjerenja

Pogreške čije vrijednosti ne znamo su izvor nesigurnosti. Pogreške koje se javljaju tijekom ispitivanja možemo podijeliti na one koje nastaju tokom samog mjerenja te one koje nastaju zbog kasnijeg oštećenja mjernog signala. Posebno je važno da se tijekom bilo kojeg mjerenja pogreške smanje što je više moguće te nakon toga odredi maksimalna pogreška mjerenja. Kako bi se pogreške koje nastaju tijekom mjerenja mogle smanjiti, potrebno je napraviti detaljnu analizu izvora pogrešaka u sustavu. Nakon analize, potrebno je pronaći način na koji bi se pogreške mogle smanjiti ili ukloniti.

Uzrok pogrešaka mogu biti:

- Mjerni instrument jer su podložni trošenju, pomacima, imaju slabu rezoluciju, dolazi do pojave šumova
- Mjerna metoda
- Objekt mjerenja koji nije stabilan
- Vještina mjeritelja
- Parametri okoline (temperatura, tlak, vlažnost itd.)

Pogreške nastale tijekom procesa mjerenja mogu se podijeliti na sustavne i slučajne pogreške.

3.2.1. Sustavne pogreške

Sustavne pogreške opisuju pogreške u izlaznim očitanjima mjernog uređaja koje se konstantno nalaze na jednoj strani ispravnog očitavanja, odnosno sve pogreške su ili pozitivne ili negativne. Glavni izvori takvih pogrešaka su poremećaji u sustavu nastali tijekom mjerenja te utjecaj promjena u okolišu. Izvori također mogu biti iskrivljene igle mjernih uređaja te mjerni uređaj koji nije umjeren.

3.2.2. Slučajne pogreške

Kod slučajnih pogrešaka razlike između mjerne vrijednosti i stvarne vrijednosti mogu biti i pozitivne i negativne te su uzrokovane slučajnim i nepredvidivim efektima. I negativne i pozitivne pogreške se najčešće javljaju u približno jednakom broju tijekom mjerenja. Do slučajnih pogrešaka često dolazi kada čovjek očitava rezultat mjerenja na skali, pogotovo ako se očitavanja nalaze između dvaju točaka na skali.

3.3. Izračun mjerne nesigurnosti

Za izračun mjerne nesigurnosti, prvo je potrebno odrediti izvore nesigurnosti te procijeniti veličinu nesigurnosti. Neovisno o izvoru, nesigurnosti se mogu procjenjivati dvama metodama: metoda procjene tipa A i metoda procjene tipa B. Tokom mjerenja, najčešće su potrebne procjene oba tipa. Kako bi se izračunala ukupna mjerna nesigurnost potrebno je, za svaku od navedenih metoda, podatke svesti na jednaku razinu pouzdanosti, odnosno na standardnu nesigurnost.

3.3.1. Izračun pojedinačne mjerne nesigurnosti

3.3.1.1. Procjene tipa A

Procjene tipa A su one procjene koje koriste statističke podatke, obično dobivene iz više puta ponovljenih mjerenja. Za podatke koje dobijemo ovom metodom, standardna nesigurnost računa se iz standardne devijacije za sve podatke dobivene mjerenjem. Ovakav način obrade podataka primjeren je Gauss-ovoj, odnosno normalnoj razdiobi, kod koje su podaci grupirani

oko srednje vrijednosti, a učestalost pojavljivanja pada kako se odmičemo od srednje vrijednosti.

Srednja vrijednost :

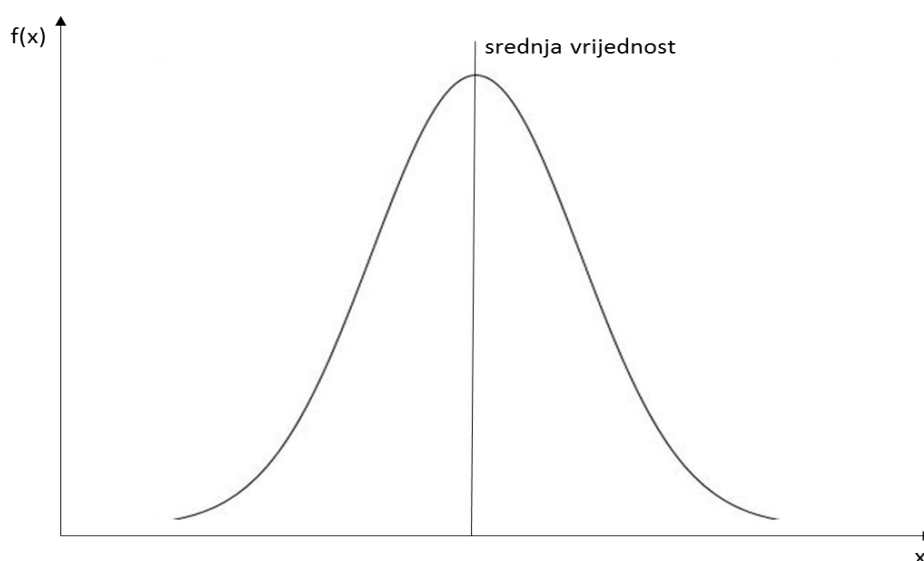
$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (1)$$

Standardna devijacija:

$$s(X) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (2)$$

Standardna devijacija srednje vrijednosti:

$$s(\bar{X}) = u_A = \frac{s(X)}{\sqrt{n}} \quad (3)$$



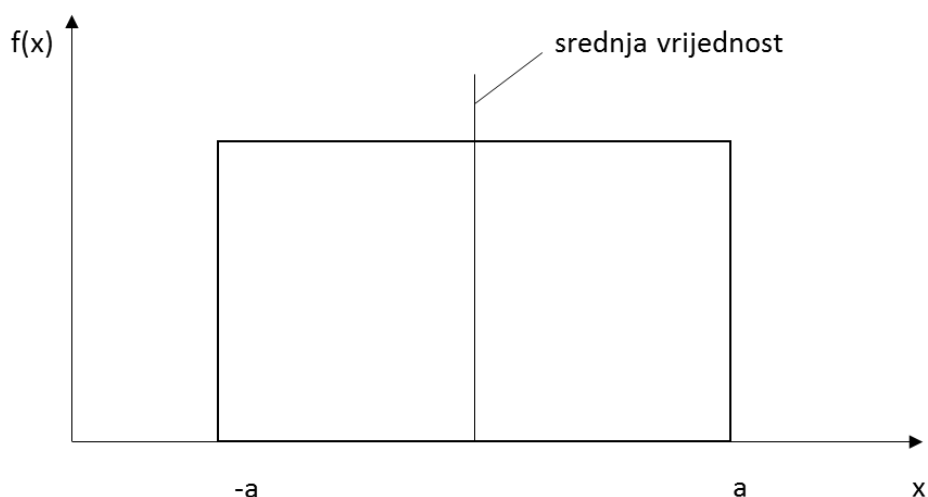
Slika 1. Gaussova raspodjela

3.3.1.2. Procjene tipa B

Procjene tipa B su one koje se baziraju na ostalim informacija, koje nisu dobivene statističkom analizom niza opažanja. One mogu biti prethodno iskustvo, iz vanjskih umjernica, proračuna, proizvođačkih specifikacija ili drugih objavljenih izvora kako što su knjige. Kod ove metode nam je poznat interval nesigurnosti u kojem se vjerojatno nalazi prava vrijednost te takvu razdiobu nazivamo pravokutnom.

Standardna nesigurnost:

$$u_B = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (4)$$



Slika 2. Pravokutna raspodjela

3.3.2. Izračun kombinirane mjerne nesigurnosti

Kada smo pojedinačne mjerne nesigurnosti sveli na standardnu nesigurnost, možemo odrediti ukupnu nesigurnost.

Ukupna nesigurnost:

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots} = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} \quad (5)$$

Ukupnu nesigurnost možemo izraziti U i kao proširenu nesigurnost koja predstavlja produkt kombinirane nesigurnosti u i faktora pokrivanja k . Proširenu nesigurnost koristimo kako bi definirali širi interval unutar kojeg očekujemo da se nalazi prava vrijednosti rezultata, i to možemo tvrditi s velikom vjerojatnošću. Faktor pokrivanja najčešće iznosi $k=2$.

Proširena nesigurnost:

$$U = k \cdot u \quad (6)$$

3.4. Doprinosi mjernoj nesigurnosti

Veliki doprinos ukupnoj mjernoj nesigurnosti pri ispitivanju termometrijske komore imaju prostorni gradijenti (prostorna nehomogenost), vremenske nestabilnosti temperature, sama napunjenost komore te utjecaj zračenja.

3.4.1. Prostorni temperaturni gradijent

Prostorni gradijenti utječu na prostornu nehomogenost temperature. Prostorna nehomogenost definirana je kao najveće odstupanje temperature u jednoj od mjernih lokacija od referentne mjerne lokacije.

Srednja vrijednost izmjerene temperature i -tog termometra (mjerne lokacije) dana je jednadžbom:

$$t_{sr}(i) = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K t_j(i) \quad (7)$$

Gdje K predstavlja broj mjerenja.

Apsolutna vrijednost prostornog gradijenta između referentne točke te jedne od mjernih lokacija je:

$$|\Delta t_{ref}| = |t_{ref} - t_{sr}(i)| \quad (8)$$

Prostorna nehomogenost temperature:

$$\delta t_{nehom} = \max |\Delta t_{ref}| \quad (9)$$

Mjerna nesigurnost zbog prostorne nehomogenosti:

$$u(\delta t_{nehom}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \delta t_{nehom} \quad (10)$$

3.4.2. Vremenska nestabilnost

Standardna nesigurnost vremenske nestabilnosti izračunata je iz standardne devijacije s , prema jednažbama od (2) i (3).

3.4.3. Utjecaj zračenja

Za temperature zraka u komori različite od okolišne temperature, temperatura unutarnjih zidova komore uvijek odstupa od temperature zraka u komori. Pod takvim uvjetima, tijela u komori ne postižu temperaturu zraka zbog izmjene topline zračenjem. To vrijedi i za ispitna tijela u komori (ako ih ima) i za termometre koji se koriste tokom ispitivanja. Razlika između temperature zraka koja se utvrđuje te temperature termometra ovisi o emisijskom faktoru površine termometra, dimenzijama i poziciji senzora, brzini zraka oko senzora te razlici između temperature zraka u komori te zidova komore.

Utjecaj zračenja može se procijeniti na jedan od četiri različita načina:

1. Određivanje utjecaja zračenja odvija se mjerenjem temperature u sredini korisnog volumena korištenjem termometra sa što većim mogućim emisijskim faktorom ($\epsilon > 0,6$) i termometra sa što manjim mogućim emisijskim faktorom ($\epsilon < 0,15$). Moguće je koristiti termometar s poliranom površinom od nikla (niska emisivnost) te termometar s teflonskom površinom (visoka emisivnost). Emisijski faktori obaju termometara moraju biti poznati, uz dovoljnu točnost. Termometar s niskim emisijskim faktorom daje približnu vrijednost temperature zraka u komori. Razlika utvrđena između pokazivanja dvaju termometara predstavlja mjeru utjecaja zračenja ako temperatura zraka u komori te temperatura zida nisu jednake.
2. Temperatura zraka se također može mjeriti termometrom koji je zaštićen od utjecaja zračenja zidova, upotrebom zaštite od zračenja. Zaštita mora biti ventilirana ili svojim dizajnom i načinom postavljanja mora dopustiti da termometar bude izložen cirkulirajućem zraku. Dok je zaštita postavljena na termometar on mjeri temperaturu zraka, a nakon njenog uklanjanja radijacijsku temperaturu. Razlika između tih temperatura predstavlja mjeru utjecaja zračenja.

3. Maksimalni utjecaj zračenja može se odrediti mjerenjem temperature zidova te temperature zraka korištenjem termometra s niskim emisijskim faktorom ili termometra sa zaštitom od zračenja.
4. Za temperature od 0 °C do 50 °C utjecaj zračenja se ne mora utvrđivati mjerenjem te se može pretpostaviti da je maksimalni doprinos mjernoj nesigurnosti 0,3 K. Ako je razlika između okolišne temperature te temperature zraka u komori veća od 30 K, utjecaj zračenja potrebno je odrediti prema jednoj od tri prethodno navede metode.

Doprinos utjecaja zračenja dan je jednadžbom:

$$\delta t_{zr} = |t_{zr} - t_{ref}| \quad (11)$$

Mjerna nesigurnost zbog zračenja:

$$u(\delta t_{zr}) = \frac{\delta t_{zr}}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

3.5. Ukupna standardna nesigurnost

Ukupna standardna mjerna nesigurnost za k=1:

$$u(k = 1) = \sqrt{u_{tref}^2 + u_{\delta tref}^2 + u_{\delta tdrift}^2 + u_{tkom}^2 + u_{\delta trez}^2 + u_{\delta tstab}^2 + u_{\delta tnehom}^2 + u_{\delta tzt}^2} \quad (13)$$

t_{ref} - srednja temperatura referentnog termometra; doprinos mjernoj nesigurnosti jednak je standardnoj devijaciji srednje vrijednosti temperature referentnog termometra

δt_{drift} - utjecaj klizanja termometara; doprinos prema iskustvu iznosi 15 mK

δt_{rez} - rezolucija namještanja temperature na komori; doprinos nesigurnosti iznosi 100 mK

δt_{ref} - odstupanje referentnog termometra; doprinos iznosi 95 mK, što je maksimalna vrijednost nesigurnosti umjeravanja termometara, prihvaćena za sve termometre na svim temperaturama radi jednostavnosti

t_{kom} - vrijesnot temperature postavljena na regulatoru komore

δt_{stab} -stabilnost temperature u komori; doprinos mjernoj nesigurnosti jednak je maksimalnoj vrijednosti standardne devijacije srednje vrijednosti

Ukupna mjerna nesigurnost za $k=2$:

$$U(k = 2) = 2 \cdot u(k = 1) \quad (14)$$

4. ISPITNI POSTUPCI

4.1. Raspored mjernih lokacija

4.1.1. Metoda A i B

Ispitivanje se provodi u više mjernih lokacija unutar korisnog volumena. Za komore volumena do 2000 l, zahtjevi za brojem i prostornom pozicijom mjernih točaka određuju se prema normi DIN EN 60068, prema kojoj mjerne lokacije čine vrhove i prostorno središte kvadra koji omeđuje korisni volumen komore. Za komore većih volumena, mjerne lokacije su raspoređene u korisnom volumenu tako da tvore kubičnu rešetku kod koje je raspon između mjernih lokacija konstantan i veličine do 1m. Na zahtjev korisnika mogu se odabrati i drugi položaji mjernih lokacija koji moraju biti opisani u certifikatu o ispitivanju te moraju odgovarati minimalnim zahtjevima o prostornom rasporedu mjernih lokacija.

Rezultati ispitivanja važeći su samo za volumen obuhvaćen mjernim točkama. Interpolacija vrijednosti dobivenih mjerenjem dozvoljena je samo za korisni volumen, dok interpolacija mjerne nesigurnosti nije dozvoljena. Također nije dozvoljena niti ekstrapolacija mjernih rezultata izvan volumena omeđenog mjernim lokacijama. Dimenzije ukupnog volumena komore te odabrane mjerne lokacije moraju biti prikazane skicom u potvrdi o ispitivanju.

4.1.2. Metoda C

Za metodu C, ispitivanja u pojedinim mjernim lokacija unutar korisnog volumena dozvoljena su samo na zahtjev korisnika. U tom slučaju, rezultati ispitivanja su važeći samo za ispitane mjerne lokacije, što mora biti naznačeno u potvrdi o ispitivanju. Doprinos mjernoj nesigurnosti uslijed lokalne prostorne nehomogenosti na mjernim lokacijama mora biti utvrđen za svaku mjernu lokaciju, korištenjem dva termometra s približnim razmakom od 2 do 5 cm između njih.

4.2. Određivanje prostornih gradijenata

Na prostornu nehomogenost utječu horizontalni i vertikalni gradijenti temperature. Temperaturni gradijent predstavlja povećanje temperature u smjeru normale na izotermnu plohu. To je vektor okomit na izotermnu plohu, s pozitivnim predznakom u smjeru povećanja temperature.

Temperaturni gradijent:

$$\text{grad } \vartheta = \vec{n}_0 \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial n} \quad (15)$$

Skalarna vrijednost temperaturnog gradijenta $\frac{\partial \vartheta}{\partial n}$ predstavlja njegovu najveću vrijednost.

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

$$(\text{grad } \vartheta)_x = \frac{\partial \vartheta}{\partial n} \cdot \cos(n, x) = \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \quad (16)$$

$$(\text{grad } \vartheta)_y = \frac{\partial \vartheta}{\partial n} \cdot \cos(n, y) = \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \quad (17)$$

$$(\text{grad } \vartheta)_z = \frac{\partial \vartheta}{\partial n} \cdot \cos(n, z) = \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \quad (18)$$

4.3. Određivanje vremenske nestabilnosti

Vremenska nestabilnost određuje se iz temperaturnih promjena zabilježenih tijekom perioda od najmanje 30 minuta nakon što su postignuti stabilni uvjeti. Stabilni uvjeti se smatraju postignutima kada sustavne promjene temperature postaju nemjerljive. Za mjerenje vremenske nestabilnosti potrebno je zabilježiti najmanje 30 mjernih rezultata tijekom 30 minuta, s više ili manje konstantnim vremenskim razmakom. Mjerenja treba provesti barem za centar korisnog volumena ili za referentnu mjernu lokaciju, pri svakoj ispitnoj temperaturi. Vremensku nestabilnost potrebno je odrediti pri svim metodama ispitivanja (A, B i C).

4.4. Određivanje dinamike zagrijavanja

Dinamika zagrijavanja predstavlja brzinu zagrijavanja od početne temperature do neke zadane temperature. Pokazuje nam koliko je vremena potrebno da se postigne novo stabilno stanje nakon promjene prvobitnih uvjeta.

5. UMJERAVANJE TERMOMETARA

Umjeravanje termometara potrebno je provesti kako bi ispitivanje karakteristika komore bilo što pouzdanije. Umjeravanje se vršilo u kupkama na istim ispitnim temperaturama kao i ispitivanje komore, odnosno na $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Za umjeravanje termometara pri temperaturama $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ koristila se jedna vrsta kupke (TEKUP01), a za preostale temperature druga vrsta kupke (TEKUP11).

5.1. Opis postupka umjeravanja termometara

Prilikom umjeravanja termometara korišten je sličan ispitni postupak za sve temperature. Pri temperaturama do $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ termometri su bili smješteni unutar izotermnog bloka kako bi se smanjio utjecaj postojećih temperaturnih gradijenata te utjecaj temperature nestabilnosti. Za umjeravanje na temperaturama $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ nije korišten izotermni blok. Nakon postavljanja termometara unutar kupke, podešavamo željenu temperaturu na regulatoru te čekamo da se ona postigne. Nakon što radni medij postigne željenu temperaturu, potrebno je pričekati da se ona ustabili. Kada se postigne dovoljna razina stabilnosti, na računalu pokrećemo program koji očitava otpore izmjerene na termometrima preko temperaturnog otporničkog mosta te spremamo očitane podatke. Na temelju tih otpora možemo izračunati temperature te odrediti odstupanja umjeranih termometara u odnosu na etalon.

5.2. Mjerna oprema i uređaji korišteni pri umjeravanju termometara

5.2.1. Etalonski termometar

Kao referentni termometar prilikom umjeravanje termometara za ispitivanje komore korišten je štapni platinski otpornički termometar proizvođača Hart Scientific, SAD. Osnovne karakteristike etalonskog termometara dane su u sljedećoj tablici.

Tablica 1. Karakteristike etalonskog termometra

Proizvođač	Hart Scientific
Model	5628
Nominalni otpor	25.5 Ω
Broj komada	2
Temperaturno područje	-200 °C do 660 °C
Način spajanja	četverožilno
Dimenzije osjetnika	Duljina: 30 mm
Dimenzije zaštitne cijevi	Promjer: 6.35 mm Duljina: 508 mm
Godišnja stabilnost, $u(C_{TT2,i})$	3 mK ($i=1, i=2$)



Slika 3. Etalonski termometar

5.2.2. Etalonski termometrijski otpornički most

Tablica 2. Karakteristike etalonskog termometrijskog most

Proizvođač	Anton Paar
Model	MKT 100
Mjerna struja	1 mA
Radno područje	0 do 440 Ω
Deklarirana točnost	< 400 $\mu\Omega$
Rezolucija, $2a(C_{XTT2})$	100 $\mu\Omega$
Vrijeme potrebno za uravnoteživanje	0.72 s
Spajanje termometara	Četverožilno



Slika 4. Etalonski termometrijski otpornički most

5.2.3. Termometrijske kupke

Tablica 3. Karakteristike termometrijskih kupki

Temperaturno područje	-20 °C do 25 °C	50 °C do 70 °C
Proizvođač	Dema	Heto Calibration
Model	2000	KB22-1
Radni medij	Etanol	Voda
Temperaturni gradijenti	< ± 40 mK	< ± 40 mK



Slika 6. Kupka (TEKUP01)



Slika 5. Kupka (TEKUP11)

5.2.4. Umjeravani termometri

Tablica 4. Karakteristike otporničkih termometara

Proizvođač	Marus
Tip	PT100
Klasa točnosti prema ISO/IEC 60751	A

5.2.5. Računalo

Računalo nam služi za trenutni prikaz mjerenja te za spremanje podataka. Prilikom umjeravanja termometara na računalu vidimo temperature koje očitavaju pojedini termometri.

5.3. Rezultati umjeravanja termometara

Tablica 5. Rezultati umjeravanja termometara na -20 °C, a

termometar	t _{et}	1	2	3
otpor, Ohm	23.3756085	92.356	92.354	92.663
standardna nesigurnost očitavanja, Ohm	0.000454742	0.003	0.003	0.003
temperatura, °C	-19.894	-19.504	-19.509	-18.721
odstupanje u odnosu na etalon		0.390	0.385	1.173
koef. Osjetljivosti, °C/Ohm	10	2.545	2.545	2.545
standardna nesigurnost očitavanja, °C	0.005	0.008	0.008	0.008

Tablica 6. Rezultati umjeravanja termometara na -20 °C, b

termometar	t _{et}	4	5	6	7	8	9	10
otpor, Ohm	23.379	92.461	92.599	92.586	92.554	92.410	92.609	92.264
standardna nesigurnost očitavanja, Ohm	0.000	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002
temperatura, °C	-19.859	-19.236	-18.884	-18.916	-18.999	-19.366	-18.858	-19.736
odstupanje u odnosu na etalon		0.623	0.976	0.943	0.861	0.493	1.001	0.124
koef. Osjetljivosti, °C/Ohm	10.000	2.545	2.545	2.545	2.545	2.545	2.545	2.545
standardna nesigurnost očitavanja, °C	0.005	0.008	0.008	0.008	0.008	0.007	0.008	0.006

Tablica 7. Rezultati umjeravanja termometara na 0 °C, a

termometar	t_et	1	2	3
otpor, Ohm	25.386	100.034	100.014	100.202
standardna nesigurnost očitavanja, Ohm	0.000	0.003	0.002	0.002
temperatura, °C	-0.112	0.086	0.035	0.517
odstupanje u odnosu na etalon		0.198	0.147	0.630
koef. Osjetljivosti, °C/Ohm	10.000	2.559	2.559	2.559
standardna nesigurnost očitavanja, °C	0.003	0.007	0.005	0.006

Tablica 8. Rezultati umjeravanja termometara na 0 °C, b

termometar	t_et	4	5	6	7	8	9	10
otpor, Ohm	25.385	100.045	100.127	100.155	100.096	100.048	100.165	99.862
standardna nesigurnost očitavanja, Ohm	0.000	0.002	0.002	0.003	0.002	0.001	0.002	0.001
temperatura, °C	-0.115	0.114	0.324	0.396	0.247	0.122	0.422	-0.354
odstupanje u odnosu na etalon		0.229	0.439	0.511	0.362	0.238	0.537	-0.239
koef. Osjetljivosti, °C/Ohm	10.000	2.559	2.559	2.559	2.559	2.559	2.559	2.559
standardna nesigurnost očitavanja, °C	0.001	0.006	0.006	0.007	0.006	0.004	0.005	0.002

Tablica 9. Rezultati umjeravanja termometara na 25 °C, a

termometar	t_et	1	2	3
otpor, Ohm	27.907	109.676	109.630	109.705
standardna nesigurnost očitavanja, Ohm	0.000	0.003	0.002	0.002
temperatura, °C	24.872	24.849	24.733	24.925
odstupanje u odnosu na etalon		-0.022	-0.139	0.053
koef. Osjetljivosti, °C/Ohm	10.000	2.577	2.577	2.577
standardna nesigurnost očitavanja, °C	0.003	0.007	0.005	0.005

Tablica 10. Rezultati umjeravanja termometara na 25 °C, b

termometar	t_et	4	5	6	7	8	9	10
otpor, Ohm	27.907	109.653	109.632	109.757	109.619	109.655	109.684	109.473
standardna nesigurnost očitavanja, Ohm	0.000	0.002	0.005	0.002	0.009	0.002	0.001	0.001
temperatura, °C	24.870	24.792	24.736	25.060	24.704	24.795	24.872	24.327
odstupanje u odnosu na etalon		-0.078	-0.133	0.191	-0.165	-0.074	0.003	-0.543
koef. Osjetljivosti, °C/Ohm	10.000	2.577	2.577	2.577	2.577	2.577	2.577	2.577
standardna nesigurnost očitavanja, °C	0.002	0.005	0.013	0.006	0.023	0.005	0.002	0.002

Tablica 11. Rezultati umjeravanja termometara na 50 °C, a

termometar	t _{et}	1	2	3
otpor, Ohm	30.416	119.282	119.201	119.292
standardna nesigurnost očitavanja, Ohm	0.000	0.001	0.001	0.000
temperatura, °C	49.925	49.705	49.495	49.730
odstupanje u odnosu na etalon		-0.220	-0.430	-0.195
koef. Osjetljivosti, °C/Ohm	10.000	2.597	2.597	2.597
standardna nesigurnost očitavanja, °C	0.001	0.003	0.003	0.001

Tablica 12. Rezultati umjeravanja termometara na 50 °C, b

termometar	t _{et}	4	5	6	7	8	9	10
otpor, Ohm	30.417	119.298	119.153	119.366	119.149	119.215	119.226	119.100
standardna nesigurnost očitavanja, Ohm	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000
temperatura, °C	49.933	49.747	49.370	49.924	49.360	49.531	49.561	49.231
odstupanje u odnosu na etalon		-0.185	-0.563	-0.009	-0.573	-0.402	-0.372	-0.702
koef. Osjetljivosti, °C/Ohm	10.000	2.597	2.597	2.597	2.597	2.597	2.597	2.597
standardna nesigurnost očitavanja, °C	0.000	0.001	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003	0.001

Tablica 13. Rezultati umjeravanja termometara na 70 °C, a

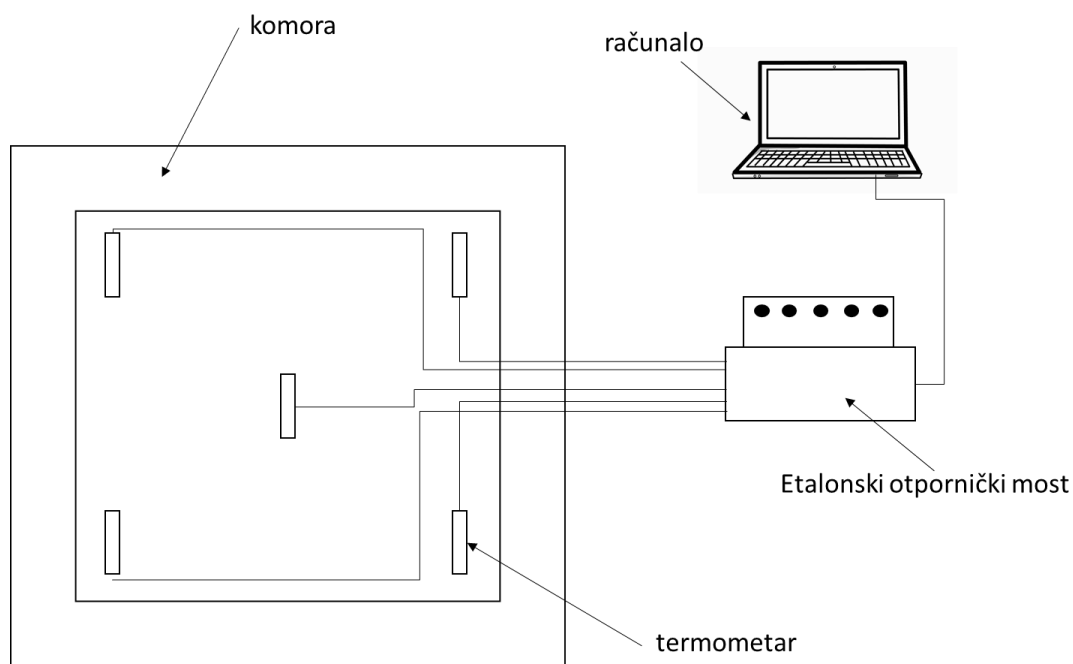
termometar	t _{et}	1	2	3
otpor, Ohm	32.412	126.888	126.615	126.888
standardna nesigurnost očitavanja, Ohm	0.000	0.004	0.008	0.003
temperatura, °C	69.997	69.518	68.803	69.515
odstupanje u odnosu na etalon		-0.480	-1.194	-0.482
koef. Osjetljivosti, °C/Ohm	10.000	2.613	2.613	2.613
standardna nesigurnost očitavanja, °C	0.003	0.010	0.020	0.007

Tablica 14. Rezultati umjeravanja termometara na 70 °C, b

termometar	t _{et}	4	5	6	7	8	9	10
otpor, Ohm	32.415	126.925	126.515	126.983	126.515	126.735	126.736	126.739
standardna nesigurnost očitavanja, Ohm	0.000	0.003	0.009	0.002	0.007	0.003	0.004	0.002
temperatura, °C	70.024	69.613	68.541	69.764	68.543	69.116	69.119	69.127
odstupanje u odnosu na etalon		-0.411	-1.483	-0.260	-1.481	-0.908	-0.905	-0.898
koef. Osjetljivosti, °C/Ohm	10.000	2.613	2.613	2.613	2.613	2.613	2.613	2.613
standardna nesigurnost očitavanja, °C	0.002	0.008	0.022	0.006	0.019	0.007	0.009	0.005

6. ISPITIVANJE KOMORE U LPM

6.1. Shema ispitnog sustava



Slika 7. Shema ispitnog sustava

6.2. Mjerni uređaji i oprema korišteni pri ispitivanju komore

6.2.1. Ispitivana komora

Tablica 15. Karakteristike komore

Temperaturno područje	-20 °C do 90 °C
Proizvođač	KÖTTERMANN
Model	2306
Dimenzije radnog volumena	550 mm x 550 mm x 800 mm (240 L)



Slika 8. Termometrijska komora

6.2.2. Etalonski termometrijski otpornički most

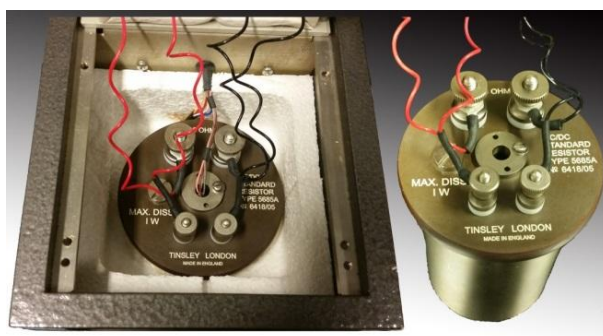
Za mjerenje otpora platinskih otpornih termometara korišten je izmjenični otporni most F700 proizvođača „ASL Limited“, Velika Britanija. Može mjeriti otpore u području od 0.25Ω do 400Ω . . Da bismo mogli koristiti isti most za mjerenje otpora više termometara, na njega je priključen multipleksor SB148/01. Multipleksor ima deset kanala za povezivanje termometara na most te se pomoću njega termometri mogu konstantno održavati na radnoj temperaturi, čime se smanjuje vrijeme potrebno da most očita otpore.



Slika 9. Etalonski termometrijski otpornički most

6.2.3. Etalonski otpornik u grijanom kućištu

U kombinaciji s odabranim mostom, omogućava nam mjerenje otpora termometara u području od $0\ \Omega$ do $399.9999\ \Omega$, s rezolucijom $0.1\ m\Omega$. Pripadne rezolucije mjerenja temperature su približno $0.3\ mK$ za termometar nominalnog otpora $100\ \Omega$ i približno $1\ mK$ za termometar nominalnog otpora $25.5\ \Omega$.



Slika 10. Etalonski otpornik u grijanom kućištu

6.2.4. Računalo

Računalo nam služi za bilježenje izmjerenih vrijednosti temperature u komori. Vrijednosti se bilježe približno svake tri minute.

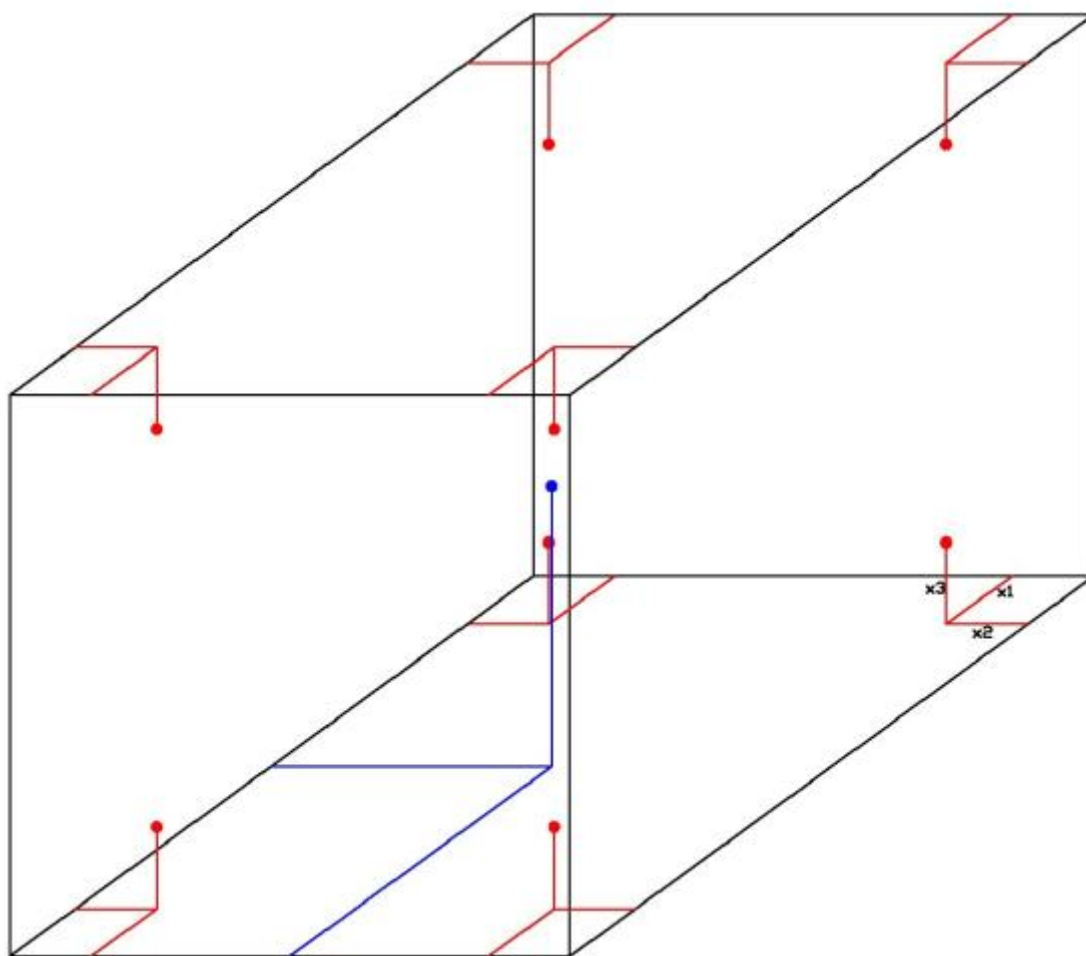
6.3. Opis postupka ispitivanja

Tijekom ispitivanja komore primjenjivala se jednaka oprema za određivanje prostorne nehomogenosti, temperaturne nestabilnosti kao i dinamike zagrijavanja. Za potrebe ispitivanja korišteno je deset otporničkih termometara smještenih na različitim mjestima unutar korisnog volumena komore. Osam termometara smješteno je na najudaljenija mjesta od sredine komore, odnosno u kutove korisnog volumena komore, dok je u sredinu smješten referentni termometar te termometar sa zaštitom od zračenja. Termometri su unutar komore smješteni pomoću metalne konstrukcije te su svi, osim referentnog termometra, od zidova komore približno udaljeni za 100 mm. Komora tijekom ispitivanja nije bila napunjena.

Nakon postavljanja termometara, može početi mjerenje. Na komori se podesi željena temperatura, te treba proći određeno vrijeme da se ona postigne. Nakon postizanja tražene temperature, potrebno je pričekati da postane stabilna. Stabilnost temperature vidimo tako što je njena vrijednost približno konstantna. Vrijeme trajanja mjerenja nakon postizanja stabilnog stanja je 3 sata.

Smještaj termometara:

- Termometar broj 1 smješten je u lijevi prednji donji kut komore
- Termometar broj 2 smješten je u lijevi stražnji donji kut komore
- Termometar broj 3 smješten je u lijevi prednji gornji kut komore
- Termometar broj 4 smješten je u lijevi stražnji gornji kut komore
- Termometar broj 5 smješten je u desni prednji gornji kut komore
- Termometar broj 6 smješten je u desni stražnji gornji kut komore
- Termometar broj 7 smješten je u desni prednji donji kut komore
- Termometar broj 8 smješten je u desni stražnji donji kut komore



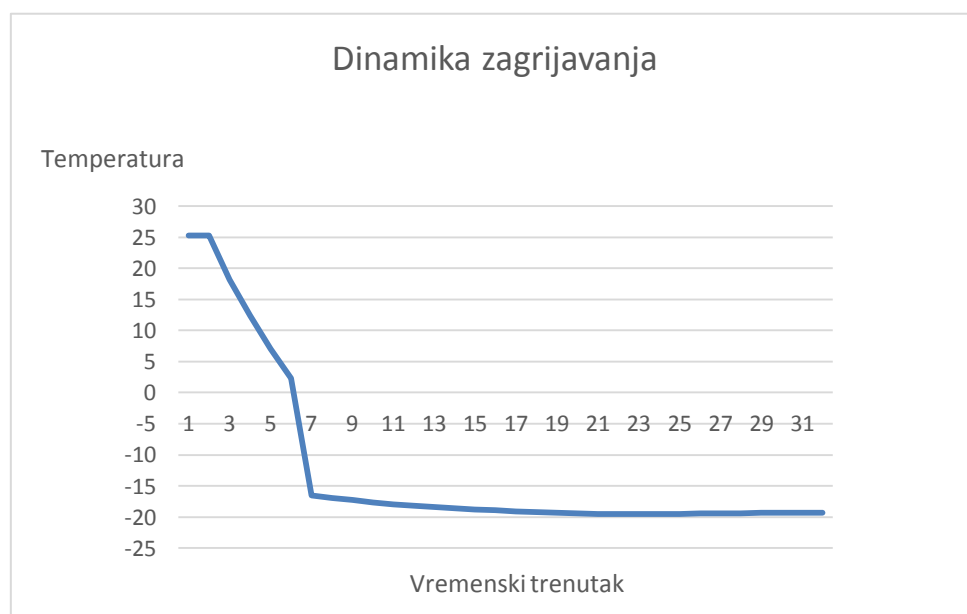
Slika 11. Smještaj termometara u komori

7. REZULTATI ISPITIVANJA KOMORE

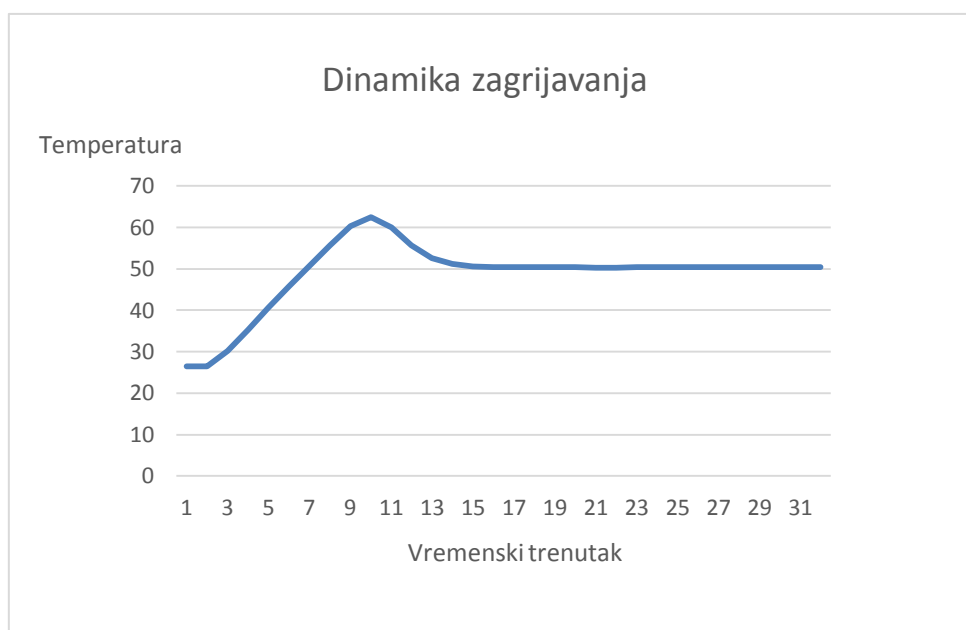
7.1. Rezultati ispitivanja dinamike zagrijavanja



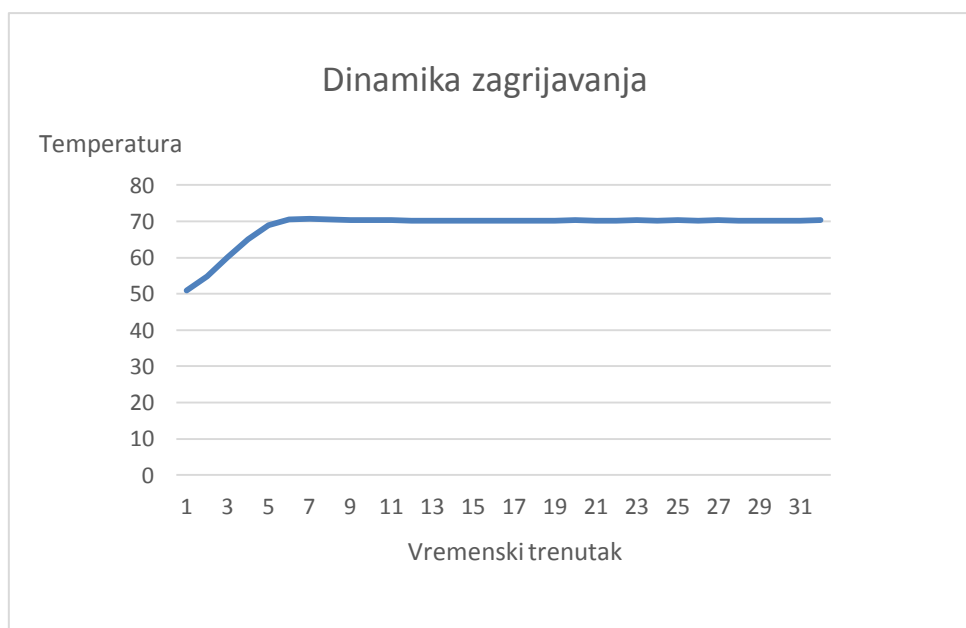
Dijagram 1. Ispitivanje dinamike zagrijavanja od -20 °C do 0 °C



Dijagram 2. Ispitivanje dinamike zagrijavanja od 25 °C do -20 °C



Dijagram 3. Ispitivanje dinamike zagrijavanja od 25 °C do 50 °C



Dijagram 4. Ispitivanje dinamike zagrijavanja od 50 °C do 70 °C

7.2. Izračun doprinosa ukupnoj mjernoj nesigurnosti

Tablica 16. Rezultati ispitivanja komore pri -20 °C

termometar	1	2	3	4	5	6	7	8	9 (ref)	10 (zrač)
$t_{sr}(i), ^\circ\text{C}$	-19.74	-19.89	-20.75	-20.61	-20.79	-20.22	-20.77	-19.90	-20.27	-20.00
$u_{stab}(k=1), \text{mK}$	17	18	19	21	21	19	22	19	18	18
$ \Delta t_{ref} , \text{mK}$	532	380	472	341	515	49	495	371	0	275
$\Delta t_{reg}, ^\circ\text{C}$	0.27									
$\delta t_{nehom}, \text{mK}$	532									
$u(\delta t_{nehom}), \text{mK}$	307									
$\delta t_{zr}, \text{mK}$	275									

Tablica 17. Izračun ukupne mjerne nesigurnosti pri -20 °C

Oznaka	Opis	Temperature i korekcije	Doprinos nesigurnosti, mK	Razdioba	Stand. nesigurnost, mK
t_{ref}	Srednja vrijednost očitavanja termometra u referentnoj mjernoj točki	-20.27	18	Normalna (1σ)	18
δt_{ref}	Odstupanje referentnog termometra	0	95	Normalna (2σ)	47.5
δt_{drift}	Klizanje termometara	0	15	Pravokutna	12
t_{kom}	Vrijednost temperature postavljena na regulatoru komore	-20	0	Normalna	0
δt_{rez}	Rezolucija namještanja temperature na komori	0	100	Pravokutna	29
δt_{stab}	Stabilnosti temperature u komori (80 min)	0	22	Normalna (1σ)	22
$\delta t_{nehomog}$	Prostorna nehomogenost temperature	0	532	Pravokutna	307
δt_{zr}	Utjecaj zračenja	0	275	Pravokutna	159
Ukupna standardna nesigurnost ($k=1, 68\%$), mK					351
Ukupna nesigurnost ($k=2, 95\%$), mK					702

Tablica 18. Rezultati ispitivanja komore pri 0 °C

termometar	1	2	3	4	5	6	7	8	9 (ref)	10 (zrač)
$t_{sr}(i), ^\circ\text{C}$	0.46	0.37	-0.04	0.06	-0.15	0.28	-0.19	0.29	0.14	0.36
$u_{stab}(k=1), \text{mK}$	3	3	6	4	5	4	6	4	3	3
$ \Delta t_{ref} , \text{mK}$	315	232	185	81	292	140	334	147	0	220
$\Delta t_{reg}, ^\circ\text{C}$	-0.14									
$\delta t_{nehom}, \text{mK}$	334									
$u(\delta t_{nehom}), \text{mK}$	193									
$\delta t_{zr}, \text{mK}$	220									

Tablica 19. Izračun ukupne mjerne nesigurnosti pri 0 °C

Oznaka	Opis	Temperature i korekcije	Doprinos nesigurnosti, mK	Razdioba	Stand. nesigurnost, mK
t_{ref}	Srednja vrijednost očitavanja termometra u referentnoj mjernoj točki	0.14	3	Normalna (1σ)	3
δt_{ref}	Odstupanje referentnog termometra	0	95	Normalna (2σ)	47.5
δt_{drift}	Klizanje termometara	0	15	Pravokutna	12
t_{kom}	Vrijednost temperature postavljena na regulatoru komore	0	0	Normalna	0
δt_{rez}	Rezolucija namještanja temperature na komori	0	100	Pravokutna	29
δt_{stab}	Nesigurnost stabilnosti temperature u komori (80 min)	0	6	Normalna (1σ)	6
$\delta t_{nehomog}$	Prostorna nehomogenost temperature	0	334	Pravokutna	193
δt_{zr}	Utjecaj zračenja	0	220	Pravokutna	127
Ukupna standardna nesigurnost ($k=1, 68\%$), mK					238
Ukupna nesigurnost ($k=2, 95\%$), mK					475

Tablica 20. Rezultati ispitivanja komore pri 25 °C

termometar	1	2	3	4	5	6	7	8	9 (ref)	10 (zrač)
$t_{sr}(i), ^\circ\text{C}$	25.57	25.53	25.61	25.58	25.60	25.56	25.56	25.49	25.57	25.58
$u_{stab}(k=1), \text{mK}$	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2
$ \Delta t_{ref} , \text{mK}$	7	35	40	14	38	5	9	75	0	11
$\Delta t_{reg}, ^\circ\text{C}$	-0.57									
$\delta t_{nehom}, \text{mK}$	75									
$u(\delta t_{nehom}), \text{mK}$	43									
$\delta t_{zr}, \text{mK}$	11									

Tablica 21. Izračun ukupne mjerne nesigurnosti pri 25 °C

Oznaka	Opis	Temperature i korekcije	Doprinos nesigurnosti, mK	Razdioba	Stand. nesigurnost, mK
t_{ref}	Srednja vrijednost očitavanja termometra u referentnoj mjernoj točki	25.57	2	Normalna (1σ)	2
δt_{ref}	Odstupanje referentnog termometra	0	95	Normalna(2σ)	47.5
δt_{drift}	Klizanje termometara	0	15	Pravokutna	12
t_{kom}	Vrijednost temperature postavljena na regulatoru komore	25	0	Normalna	0
δt_{rez}	Rezolucija namještanja temperature na komori	0	100	Pravokutna	29
δt_{stab}	Nesigurnost stabilnosti temperature u komori (80 min)	0	2	Normalna (1σ)	2
$\delta t_{nehomog}$	Prostorna nehomogenost temperature	0	75	Pravokutna	43
δt_{zr}	Utjecaj zračenja	0	11	Pravokutna	6
Ukupna standardna nesigurnost ($k=1$, 68 %), mK					72
Ukupna nesigurnost ($k=2$, 95 %), mK					144

Tablica 22. Rezultati ispitivanja komore pri 50 °C

termometar	1	2	3	4	5	6	7	8	9 (ref)	10 (zrač)
$t_{sr}(i), ^\circ\text{C}$	50.62	50.82	51.00	50.65	51.03	50.66	50.94	50.66	50.75	50.54
$u_{stab}(k=1), \text{mK}$	4	4	9	5	5	5	5	4	5	4
$ \Delta t_{ref} , \text{mK}$	132	76	252	96	281	83	189	85	0	210
$\Delta t_{reg}, ^\circ\text{C}$	-0.75									
$\delta t_{nehom}, \text{mK}$	281									
$u(\delta t_{nehom}), \text{mK}$	163									
$\delta t_{zr}, \text{mK}$	210									

Tablica 23. Izračun ukupne mjerne nesigurnosti pri 50 °C

Oznaka	Opis	Temperature i korekcije	Doprinos nesigurnosti, mK	Razdioba	Stand. nesigurnost, mK
t_{ref}	Srednja vrijednost očitavanja termometra u referentnoj mjernoj točki	50.75	5	Normalna (1σ)	5
δt_{ref}	Odstupanje referentnog termometra	0	95	Normalna (2σ)	47.5
δt_{drift}	Klizanje termometara	0	15	Pravokutna	12
t_{kom}	Vrijednost temperature postavljena na regulatoru komore	50	0	Normalna	0
δt_{rez}	Rezolucija namještanja temperature na komori	0	100	Pravokutna	29
δt_{stab}	Nesigurnost stabilnosti temperature u komori (80 min)	0	9	Normalna (1σ)	9
$\delta t_{nehomog}$	Prostorna nehomogenost temperature	0	281	Pravokutna	163
δt_{zr}	Utjecaj zračenja	0	210	Pravokutna	121
Ukupna standardna nesigurnost ($k=1$, 68 %), mK					211
Ukupna nesigurnost ($k=2$, 95 %), mK					422

Tablica 24. Rezultati ispitivanja komore pri 70 °C

termometar	1	2	3	4	5	6	7	8	9 (ref)	10 (zrač)
$t_{sr}(i), ^\circ\text{C}$	70.83	71.58	71.51	71.01	72.04	70.92	71.86	71.02	71.16	70.57
$u_{stab}(k=1), \text{mK}$	6	5	10	7	11	4	4	3	4	4
$ \Delta t_{ref} , \text{mK}$	328	421	345	153	877	241	700	143	0	586
$\Delta t_{reg}, ^\circ\text{C}$	-1.16									
$\delta t_{nehom}, \text{mK}$	877									
$u(\delta t_{nehom}), \text{mK}$	506									
$\delta t_{zr}, \text{mK}$	586									

Tablica 25. Izračun ukupne mjerne nesigurnosti pri 70 °C

Oznaka	Opis	Temperature i korekcije	Doprinos nesigurnosti, mK	Razdioba	Stand. nesigurnost, mK
t_{ref}	Srednja vrijednost očitavanja termometra u referentnoj mjernoj točki	71.16	4	Normalna (1σ)	4
δt_{ref}	Odstupanje referentnog termometra	0	95	Normalna(2σ)	47.5
δt_{drift}	Klizanje termometara	0	15	Pravokutna	12
t_{kom}	Vrijednost temperature postavljena na regulatoru komore	70	0	Normalna	0
δt_{rez}	Rezolucija namještanja temperature na komori	0	100	Pravokutna	29
δt_{stab}	Nesigurnost stabilnosti temperature u komori (80 min)	0	11	Normalna (1σ)	11
$\delta t_{nehomog}$	Prostorna nehomogenost temperature	0	877	Pravokutna	506
δt_{zr}	Utjecaj zračenja	0	586	Pravokutna	338
Ukupna standardna nesigurnost (k=1, 68 %), mK					612
Ukupna nesigurnost (k=2, 95 %), mK					1224

8. ZAKLJUČAK

U ovome radu ispitana je termometrijska komora te su umjereni otpornički termometri. Mjerenja su provedena kako bi se odredila ukupna mjerna nesigurnost komore te kako bismo vidjeli što ima najveći utjecaj na mjernu nesigurnost komore.

Kod umjeravanja termometara vidimo da odstupanja temperature ispitivanih termometara od etalonskog nisu značajno različita uslijed same promjene temperature nego na njih utječu neki vanjski čimbenici.

Najveći utjecaj na mjernu nesigurnost umjeravanja komore ima prostorna nehomogenost, a nakon toga zračenje. Možemo vidjeti da se povećanjem temperature najčešće povećava i prostorna nehomogenost. Utjecaj zračenja javlja se kada se temperatura u komori razlikuje od vanjske okolišne temperature. Možemo vidjeti da se taj utjecaj na temperaturama do 50 °C ne razlikuje znatno, dok je na temperaturi od 70 °C veći i više od dva puta.

Što je razlika između temperature u komori te vanjske okolišne temperature veća veći su i utjecaji koji pridonose ukupnoj mjernoj nesigurnosti umjeravanja.

LITERATURA

- [1] Calibration of Climatic Chamber, DKD, 2004.
- [2] Galović, A.: Termodinamika I, FSB, Zagreb, 2013.
- [3] Zaimović-Uzunović, N.: Mjerna tehnika, Zenica, 2006.
- [4] Morris, A. S.: Measurements and Instrumentation Principles, 2001.
- [5] Zvizdić, D.: Mjerenja u energetici, podloge za predavanja
- [6] Galović, A.: Termodinamika II, FSB, Zagreb, 2014.
- [7] Jones, D. P.: Biomedical sensors, Momentum Press, 2010.

PRILOZI

Tablica 26. Izmjerene vrijednosti temperature pri -20° C

Termometar/broj mjerenja	1	2	3	4	5	6	7	8	9 (ref)	10 (zrač)
j=1	-19.555	-19.742	-19.835	-20.262	-20.075	-19.516	-20.199	-19.671	-19.516	-20.122
j=2	-19.532	-19.719	-19.781	-20.216	-20.030	-19.502	-20.120	-19.608	-19.453	-20.058
j=3	-19.500	-19.655	-19.748	-20.186	-19.999	-19.441	-20.124	-19.596	-19.441	-20.032
j=4	-19.473	-19.628	-19.691	-20.156	-19.970	-19.411	-20.025	-19.524	-19.385	-19.991
j=5	-19.432	-19.587	-19.650	-20.100	-19.914	-19.356	-20.031	-19.504	-19.348	-19.938
j=6	-19.411	-19.566	-19.629	-20.033	-19.878	-19.350	-19.956	-19.451	-19.327	-19.933
j=7	-19.405	-19.561	-19.592	-19.965	-19.810	-19.298	-19.981	-19.454	-19.299	-19.904
j=8	-19.377	-19.517	-19.579	-20.006	-19.820	-19.292	-19.898	-19.402	-19.278	-19.884
j=9	-19.326	-19.481	-19.543	-19.978	-19.792	-19.264	-19.870	-19.373	-19.248	-19.854
j=10	-19.327	-19.482	-19.545	-19.995	-19.747	-19.219	-19.903	-19.391	-19.235	-19.841
j=11	-19.314	-19.469	-19.531	-19.935	-19.780	-19.252	-19.858	-19.360	-19.236	-19.842
j=12	-19.314	-19.469	-19.532	-19.936	-19.781	-19.253	-19.859	-19.355	-19.230	-19.821
j=13	-19.293	-19.448	-19.511	-19.930	-19.775	-19.248	-19.854	-19.350	-19.226	-19.816
j=14	-19.289	-19.444	-19.507	-19.941	-19.755	-19.227	-19.832	-19.335	-19.211	-19.817
j=15	-19.289	-19.445	-19.507	-19.942	-19.756	-19.228	-19.834	-19.334	-19.210	-19.815
j=16	-19.288	-19.443	-19.506	-19.910	-19.755	-19.227	-19.841	-19.336	-19.212	-19.818
j=17	-19.290	-19.446	-19.508	-19.943	-19.742	-19.214	-19.827	-19.347	-19.222	-19.828
j=18	-19.301	-19.456	-19.519	-19.900	-19.745	-19.218	-19.835	-19.370	-19.215	-19.821
j=19	-19.293	-19.448	-19.542	-19.911	-19.756	-19.228	-19.842	-19.353	-19.229	-19.835
j=20	-19.307	-19.463	-19.525	-19.900	-19.744	-19.217	-19.838	-19.373	-19.218	-19.824
j=21	-19.296	-19.451	-19.513	-19.907	-19.752	-19.224	-19.838	-19.373	-19.233	-19.823
j=22	-19.296	-19.451	-19.513	-19.949	-19.697	-19.185	-19.861	-19.349	-19.209	-19.815
j=23	-19.287	-19.443	-19.505	-19.940	-19.754	-19.226	-19.816	-19.351	-19.212	-19.817
j=24	-19.299	-19.445	-19.477	-19.912	-19.725	-19.213	-19.819	-19.338	-19.199	-19.805
j=25	-19.295	-19.433	-19.526	-19.942	-19.755	-19.228	-19.833	-19.335	-19.212	-19.817

Tablica 27. Izmjerene vrijednosti temperature pri 0 °C

Termometar/broj mjerenja	1	2	3	4	5	6	7	8	9 (ref)	10 (zrač)
j=1	0.668	0.527	0.589	0.308	0.308	0.823	0.200	0.544	0.700	0.137
j=2	0.668	0.527	0.589	0.308	0.308	0.813	0.181	0.540	0.680	0.118
j=3	0.649	0.523	0.586	0.273	0.257	0.772	0.163	0.522	0.678	0.131
j=4	0.662	0.521	0.584	0.302	0.302	0.809	0.192	0.535	0.691	0.129
j=5	0.660	0.519	0.581	0.300	0.299	0.787	0.100	0.537	0.662	0.130
j=6	0.661	0.505	0.599	0.286	0.282	0.782	0.165	0.524	0.680	0.118
j=7	0.649	0.523	0.586	0.304	0.304	0.807	0.155	0.514	0.670	0.123
j=8	0.654	0.513	0.575	0.294	0.294	0.783	0.095	0.532	0.657	0.126
j=9	0.657	0.532	0.625	0.281	0.281	0.796	0.173	0.532	0.688	0.126
j=10	0.657	0.531	0.594	0.281	0.250	0.757	0.140	0.499	0.655	0.108
j=11	0.639	0.514	0.639	0.326	0.326	0.817	0.193	0.537	0.693	0.130
j=12	0.661	0.520	0.551	0.270	0.270	0.785	0.121	0.496	0.652	0.112
j=13	0.642	0.486	0.517	0.236	0.251	0.766	0.173	0.516	0.672	0.110
j=14	0.641	0.515	0.609	0.296	0.281	0.780	0.170	0.514	0.670	0.107
j=15	0.638	0.513	0.576	0.294	0.262	0.770	0.160	0.519	0.675	0.113
j=16	0.644	0.519	0.581	0.300	0.300	0.768	0.158	0.517	0.673	0.127
j=17	0.657	0.517	0.579	0.297	0.313	0.821	0.211	0.554	0.711	0.148
j=18	0.679	0.554	0.647	0.335	0.335	0.842	0.225	0.584	0.724	0.162
j=19	0.693	0.552	0.614	0.302	0.301	0.803	0.180	0.523	0.679	0.117
j=20	0.648	0.522	0.538	0.256	0.288	0.792	0.198	0.510	0.666	0.119
j=21	0.650	0.509	0.572	0.259	0.259	0.767	0.173	0.532	0.688	0.133
j=22	0.664	0.523	0.585	0.273	0.273	0.780	0.171	0.514	0.670	0.108
j=23	0.638	0.513	0.576	0.294	0.294	0.789	0.168	0.511	0.668	0.105
j=24	0.636	0.511	0.573	0.292	0.307	0.810	0.192	0.508	0.664	0.101
j=25	0.632	0.507	0.570	0.257	0.257	0.772	0.178	0.522	0.678	0.115

Tablica 28. Izmjerene vrijednosti temperature pri 25 °C

Termometar/broj mjerenja	1	2	3	4	5	6	7	8	9 (ref)	10 (zrač)
j=1	25.539	25.381	25.649	25.491	25.459	25.742	25.380	25.412	25.553	25.018
j=2	25.537	25.379	25.647	25.489	25.457	25.741	25.378	25.410	25.567	25.032
j=3	25.543	25.385	25.653	25.495	25.463	25.747	25.384	25.415	25.557	25.022
j=4	25.541	25.383	25.651	25.493	25.461	25.744	25.382	25.414	25.571	25.035
j=5	25.547	25.389	25.657	25.499	25.467	25.750	25.388	25.419	25.561	25.026
j=6	25.545	25.387	25.654	25.497	25.465	25.748	25.386	25.418	25.575	25.039
j=7	25.551	25.393	25.660	25.503	25.471	25.754	25.392	25.408	25.565	25.030
j=8	25.549	25.391	25.658	25.501	25.469	25.752	25.390	25.421	25.563	25.028
j=9	25.547	25.389	25.657	25.499	25.467	25.750	25.388	25.419	25.561	25.026
j=10	25.545	25.387	25.654	25.497	25.465	25.748	25.386	25.418	25.575	25.039
j=11	25.551	25.393	25.660	25.503	25.471	25.754	25.392	25.408	25.565	25.030
j=12	25.549	25.391	25.658	25.501	25.469	25.752	25.390	25.421	25.563	25.028
j=13	25.547	25.389	25.657	25.499	25.467	25.750	25.388	25.419	25.577	25.041
j=14	25.560	25.403	25.668	25.511	25.479	25.746	25.400	25.407	25.565	25.030
j=15	25.549	25.391	25.658	25.501	25.469	25.752	25.390	25.421	25.579	25.043
j=16	25.554	25.397	25.664	25.507	25.475	25.758	25.396	25.412	25.569	25.033
j=17	25.553	25.395	25.662	25.505	25.473	25.756	25.394	25.425	25.583	25.047
j=18	25.559	25.401	25.668	25.511	25.479	25.762	25.400	25.415	25.573	25.038
j=19	25.556	25.399	25.666	25.509	25.477	25.760	25.398	25.429	25.571	25.035
j=20	25.555	25.397	25.664	25.507	25.475	25.758	25.396	25.427	25.585	25.049
j=21	25.568	25.411	25.670	25.513	25.481	25.764	25.402	25.418	25.575	25.039
j=22	25.559	25.401	25.668	25.511	25.479	25.762	25.400	25.431	25.573	25.038
j=23	25.556	25.399	25.666	25.509	25.477	25.760	25.414	25.414	25.571	25.051
j=24	25.570	25.413	25.677	25.519	25.488	25.755	25.409	25.424	25.582	25.046
j=25	25.565	25.408	25.675	25.517	25.486	25.769	25.406	25.422	25.579	25.044

Tablica 29. Izmjerene vrijednosti temperature pri 50 °C

Termometar/broj mjerenja	1	2	3	4	5	6	7	8	9 (ref)	10 (zrač)
j=1	50.385	50.385	50.828	50.479	50.479	50.669	50.352	50.256	50.383	49.844
j=2	50.382	50.382	50.858	50.484	50.484	50.674	50.357	50.230	50.373	49.833
j=3	50.372	50.372	50.847	50.474	50.474	50.665	50.379	50.252	50.379	49.839
j=4	50.378	50.378	50.821	50.472	50.472	50.662	50.377	50.250	50.377	49.837
j=5	50.408	50.408	50.883	50.502	50.502	50.692	50.406	50.279	50.406	49.867
j=6	50.406	50.406	50.849	50.484	50.484	50.674	50.388	50.261	50.388	49.849
j=7	50.388	50.387	50.760	50.442	50.442	50.633	50.315	50.252	50.315	49.792
j=8	50.362	50.362	50.743	50.425	50.425	50.615	50.330	50.234	50.361	49.822
j=9	50.361	50.361	50.852	50.487	50.487	50.677	50.391	50.264	50.391	49.852
j=10	50.422	50.422	50.866	50.501	50.501	50.691	50.405	50.278	50.405	49.865
j=11	50.403	50.395	50.742	50.425	50.425	50.615	50.298	50.234	50.329	49.790
j=12	50.360	50.360	50.804	50.439	50.439	50.638	50.352	50.233	50.359	49.820
j=13	50.391	50.391	50.882	50.517	50.517	50.707	50.389	50.294	50.420	49.849
j=14	50.420	50.420	50.860	50.495	50.495	50.685	50.399	50.272	50.399	49.859
j=15	50.430	50.413	50.777	50.460	50.459	50.650	50.364	50.268	50.364	49.824
j=16	50.395	50.392	50.765	50.447	50.447	50.637	50.351	50.232	50.359	49.820
j=17	50.390	50.390	50.763	50.445	50.445	50.635	50.350	50.239	50.365	49.826
j=18	50.397	50.397	50.785	50.467	50.467	50.658	50.372	50.245	50.388	49.849
j=19	50.419	50.419	50.799	50.482	50.482	50.672	50.386	50.259	50.386	49.847
j=20	50.418	50.409	50.774	50.457	50.457	50.647	50.361	50.266	50.361	49.822
j=21	50.392	50.392	50.756	50.439	50.438	50.628	50.342	50.278	50.373	49.834
j=22	50.405	50.389	50.769	50.452	50.452	50.642	50.356	50.261	50.388	49.849
j=23	50.387	50.387	50.768	50.450	50.450	50.640	50.355	50.291	50.354	49.815
j=24	50.386	50.386	50.766	50.449	50.448	50.639	50.353	50.290	50.353	49.813
j=25	50.416	50.400	50.772	50.455	50.455	50.645	50.359	50.264	50.391	49.851

Tablica 30. Izmjerene vrijednosti temperature pri 70 °C

Termometar/broj mjerenja	1	2	3	4	5	6	7	8	9 (ref)	10 (zrač)
j=1	70.382	70.446	71.147	70.700	70.679	70.679	70.416	70.128	70.256	69.681
j=2	70.319	70.446	71.068	70.621	70.605	70.621	70.427	70.139	70.266	69.660
j=3	70.297	70.393	71.031	70.584	70.584	70.648	70.360	70.089	70.232	69.658
j=4	70.292	70.387	71.025	70.578	70.578	70.642	70.371	70.099	70.227	69.652
j=5	70.354	70.386	71.087	70.640	70.624	70.656	70.384	70.113	70.272	69.666
j=6	70.367	70.431	71.061	70.614	70.582	70.678	70.390	70.119	70.246	69.672
j=7	70.342	70.405	71.107	70.612	70.612	70.676	70.389	70.125	70.269	69.694
j=8	70.395	70.395	71.097	70.618	70.609	70.673	70.402	70.130	70.258	69.683
j=9	70.385	70.385	71.015	70.633	70.538	70.665	70.378	70.106	70.266	69.691
j=10	70.329	70.393	71.015	70.568	70.568	70.663	70.376	70.104	70.232	69.658
j=11	70.359	70.359	70.981	70.596	70.532	70.655	70.367	70.095	70.223	69.648
j=12	70.349	70.349	70.971	70.528	70.526	70.654	70.366	70.079	70.238	69.632
j=13	70.334	70.350	70.980	70.600	70.536	70.664	70.377	70.105	70.233	69.658
j=14	70.360	70.376	71.076	70.597	70.581	70.677	70.389	70.118	70.277	69.701
j=15	70.338	70.402	71.032	70.593	70.589	70.684	70.397	70.126	70.285	69.711
j=16	70.348	70.412	70.994	70.609	70.481	70.641	70.353	70.090	70.249	69.675
j=17	70.344	70.344	70.950	70.566	70.439	70.598	70.326	70.071	70.231	69.656
j=18	70.358	70.358	70.995	70.612	70.548	70.676	70.388	70.117	70.260	69.686
j=19	70.387	70.387	71.025	70.578	70.551	70.676	70.389	70.118	70.277	69.703
j=20	70.340	70.372	70.994	70.547	70.546	70.674	70.387	70.115	70.274	69.700
j=21	70.338	70.370	70.992	70.617	70.513	70.672	70.384	70.121	70.265	69.690
j=22	70.392	70.392	70.974	70.607	70.543	70.670	70.383	70.119	70.279	69.704
j=23	70.342	70.374	70.996	70.549	70.547	70.674	70.387	70.123	70.267	69.692
j=24	70.394	70.394	71.016	70.569	70.505	70.664	70.377	70.114	70.257	69.682
j=25	70.384	70.384	70.958	70.579	70.459	70.618	70.347	70.095	70.255	69.680