Ispitivanje karakteristika higrostatirane komore

Miškić, Josip

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:755852

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Josip Miškić

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Davor Šestan

Student:

Josip Miškić

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem doc. dr. sc. Danijelu Šestanu na savjetima, znanju, materijalima i pruženoj pomoći tijekom izrade praktičnog dijela završnog rada.

Zahvaljujem asistentu Ivanu Matasu na pomoći tijekom izrade praktičnog dijela završnog rada.

Zahvaljujem i svojoj obitelji na pruženoj podršci i razumijevanju tijekom preddiplomskom studija.

Josip Miškić.

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, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: Josip Miškić Mat. br.: 0035206836

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje karakteristika higrostatirane komore**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Investigation of the performances of climatic chamber**

Opis zadatka:

Potrebno je definirati i provesti postupak ispitivanja karakteristika higrostatirane komore u temperaturnom području od 30 °C do 70 °C, pri čemu je regulator relativne vlažnosti zraka u komori postavljen na vrijednost 50 %rh. Ispitivanjem je potrebno odrediti prostorne gradijente i vremensku stabilnost temperature i relativne vlažnosti zraka unutar radnog volumena komore. 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 higrostatiranih komora.
- Definirati i opisati postupak ispitivanja karakteristika higrostatirane komore, uključujući određivanje gradijenata i stalnosti temperature i relativne vlažnosti zraka unutar radnog volumena komore.
- Izraditi shemu spajanja i dati opis ispitnog sustava.
- Sastaviti mjernu liniju za ispitivanje, koristeći postojeće uređaje i pomoćnu opremu koja je na raspolaganju u FSB-LPM.
- Priložiti rezultate ispitivanja komore u ispitnom točkama: 10 °C, 30 °C i 50 °C, pri relativnoj vlažnosti zraka od 50 %rh.
- Opisati postupak procjene i procijeniti utjecaj karakteristika komore na ukupnu mjernu nesigurnost umjeravanja mjerila relativne vlažnosti zraka, u slučaju kada se ispitana komora koristi za umjeravanja mjerila relativne vlažnosti zraka.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
28. studenog 2019.

Datum predaje rada:
1. rok: 21. veljače 2020.
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 24.2. – 28.2.2020.
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:
Šestan
Doc. dr. sc. Danijel Šestan

Predsjednik Povjerenstva:
Balen
Prof. dr. sc. Igor Balen

SAŽETAK

Osnovni zadatak ovog završnog rada je definirati i provesti postupak ispitivanja karakteristika higrostatirane komore u temperaturnom području od 30 °C do 70 °C, pri čemu je regulator vlažnosti postavljen na vrijednost 50 % relativne vlažnosti. Osim definiranja i opisivanja postupaka ispitivanja karakteristika higrostatirane komore, što uključuje određivanje gradijenata i stalnosti temperature i relativne vlažnosti zraka unutar radnog volumena komore, potrebno je prethodno umjeriti korištene termometre u termostatirnoj kupki. Umjeravanje se provodi kako bi se utvrdilo njihovo odstupanje od temperature izmjerene etalonskim termometrom, a tim postupkom dovodimo termometre u vezu s definicijom temperature i osiguravamo sljedivost prema SI sustavu te određujemo pripadnu mjernu nesigurnost.

Ispitivanje komore provedeno je prema radnoj uputi, izrađenoj u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Calibration of climatic and thermostated chambers – CV - VL03. U radnoj uputi objašnjena je mjerna nesigurnost, njezini uzroci te tipovi procjene mjerne nesigurnosti. Dani su osnovni podaci, uvjeti, preporučena je oprema, način i slijed provođenja testiranja za svaku pojedinu metodu ispitivanja komore. Uputa nam daje i formule potrebne za obradu podataka dobivenih mjerenjem, kao i za izračun mjernih nesigurnosti i konačne proširene mjerne nesigurnosti.

Ispitivanje karakteristika higrostatirane komore provodi se kako bi se odredili prostorni gradijenti i vremenska stabilnost temperature i relativne vlažnosti, dobivenim rezultatima mogu se donijeti zaključci o primjenjivosti komore u određene svrhe. Od komore se očekuje da osigura jednoličnu prostornu temperaturnu distribuciju pri određenoj relativnoj vlažnosti kako bi se mogla koristiti za umjeravanje termometara i higrometara. U radu su izloženi dobiveni rezultati u zadanim radnim točkama, a uz same rezultate priloženi su pripadni grafovi i tablice.

Ključne riječi: higrostatirana komora, ispitivanje karakteristika, gradijenti i stalnost temperature i relativne vlažnost.

SUMMARY

The main task of this work is to define and perform the procedure for testing climatic chamber in the temperature range between 10 °C and 70 °C, while relative humidity is set on 50 %. Besides defining and describing a procedure for testing climatic chamber, which includes: determination of gradients and stability of temperature and relative humidity in the chamber working volume, it was required to calibrate resistance thermometers to determine their individual characteristic and to relate thermometers with definition of temperature.

The guide used for testing is Calibration of climatic and thermostated chambers – CV – VL03 is made by Laboratory for process measurements, Faculty of mechanical engineering and naval architecture. The guide explains the estimation of related measurement uncertainty and their causes. Also, it gives basic information, conditions, recommended equipment, method and sequence for testing. This guide recommends equations for analysis of data obtained through measurement in the chamber and related measurement uncertainty..

The characteristics of the climatic chamber include volume gradients and temporal stability of temperature and relative humidity in its working volume. These results are later used for estimation of chamber influence on the calibration uncertainty when it is used for calibration of thermo-hygrometers. The climatic chamber needs to ensure temperature appropriate homogeneities of temperature and relative humidity as well as their temporal stabilities. Results of testing are shown in tabular and graphical forms.

Key word: hygrostatic chamber, determination of chamber characteristic, temperature and humidity gradients and stability

SADRŽAJ

SAŽETAK **1**

SUMMARY **2**

POPIS SLIKA **5**

POPIS TABLICA **6**

POPIS GRAFOVA **8**

POPIS OZNAKA **9**

DEFINICIJE **10**

1. UVOD **11**

2. UMJERAVANJE TERMOMETARA I ISPITIVANJE HIGROSTATIRANE KOMORE **12**

3. KORIŠTENA OPREMA **13**

3.1 KUPKA (LAB. TEKUP 11) 13

3.2 OTPORNIČKI TERMOMETRI 15

3.3 HIGROMETAR 16

3.4 MJERNA POSTAJA 17

3.5 HIGROSTATIRANA KOMORA 19

3.6 OSOBNO RAČUNALO 20

4. UMJERAVANJE TERMOMETARA **21**

4.1 REZULTATI UMJERAVANJA 23

4.2 IZRAČUN INVIDUALNIH KOEFICIJENATA TERMOMETARA 24

4.3 PROCJENA NESIGURNOSTI UMJERAVANJA 26

5. METODA ISPITIVANJA HIGROSTATIRANE KOMORE **27**

5.1 TEMPERATURE ISPITIVANJA 27

5.2 TEMPERATURNI GRADIJETNI 28

5.3 ISPITNA ZONA 29

5.4 ISPITIVANJE PROSTORNE NEHOMOGENOSTI 29

5.5 ISPITIVANJE VREMENSKE NESTABILNOSTI 30

6. UPUTE I SMJERNICE ZA ISPITIVANJE **31**

6.1 OSNOVNI PODACI O UPUTI 31

6.2 POTREBNA OPREMA 31

6.3 UVJETI ISPITIVANJA 32

6.4 PRIPREME ZA MJERENJE 32

7. TIJEK ISPITIVANJA 34

7.1 MJERENJE PROSTORNE HOMOGENOSTI I UTJECAJA RADIJACIJE 34

7.2 VREMENSKA NESTABILNOST 35

8. OBRADA REZULTATA MJERENJA 36

8.1 PROSTORNA NEHOMOGENOST 36

8.1.1 PROSTORNA NEHOMOGENOST TEMPERATURE 36

8.1.2 PROSTORNA NEHOMOGENOST VLAGE 37

8.2 VREMENSKA NESTABILNOST 39

8.2.1 VREMENSKA NESTABILNOST TEMPERATURE 39

8.2.2 VREMENSKA NESTABILNOST VLAGE 40

8.3 UTJECAJ ZRAČENJA 41

8.4 NESIGUROST STANDARDNIH MJERNIH UREĐAJA 42

8.4.1 TEMPERATURNIH MJERNIH UREĐAJA 42

8.4.2 UREĐAJA ZA MJERENJE VLAGE 42

8.5 ODSTUPANJE TEMPERATURE POSTAVLJENE NA REGULATORU KOMORE 42

8.6 IZRAČUN DOPRINOSA MJERNOJ NESIGURNOSTI 43

9. ISPITIVANJE KARAKTERISTIKA HIGROSTATIRANE KOMORE 44

9.1 POSTUPAK ISPITIVANJA KARAKTERISTIKA KOMORE 44

9.2 OBRADA IZMJERENIH REZULTATA 46

9.2.1 TEMPERATURA NA REGULATORU KOMORE POSTAVLJENA NA 10 °C 47

9.2.2 TEMPERATURA NA REGULATORU KOMORE POSTAVLJENA NA 30 °C 49

9.2.3 TEMPERATURA NA REGULATORU KOMORE POSTAVLJENA NA 50 °C 51

9.2.4 TEMPERATURA NA REGULATORU KOMORE POSTAVLJENA NA 70 °C 53

9.2.5 MJERNA NESIGURNOST UMJERAVANJA MJERILA RELATIVNE VLAŽNOSTI 55

10. ZAKLJUČAK 64

LITERATURA 65

POPIS SLIKA

Slika 1 Kupka Heto Calibration KB 22 – 1, lab. TEKUP 11 14
Slika 2 Mjerna postaja – Multipleksor s upravljačkom jedinicom i otporničkim mostom 17
Slika 3 Higrostatirana komora 20
Slika 4 Oprema za provođenje umjeravanja 21
Slika 5 Izotermalni blok za umjeravanje termometara 22
Slika 6 Temperaturni gradijenti 28
Slika 7 Raspored termometara u radnom volumenu komore 29
Slika 8 Oprema korištena za ispitivanje karakteristika higrostatirane komore 44
Slika 9 Mjerne lokacije termometara i higrometra 45

POPIS TABLICA

Tablica 1 Tehničke specifikacije kupke 13
Tablica 2 Tablica serijskih brojeva korištenih industrijskih optorničkih termometara 15
Tablica 3 Tehničke specifikacije etalonskog termometra 15
Tablica 4 Tehničke specifikacije higrometra 16
Tablica 5 Tehničke specifikacije Multipleksora 17
Tablica 6 Tehničke specifikacije višekanalne upravljačke jedinice 18
Tablica 7 Tehničke specifikacije Otporničkog mosta 18
Tablica 8 Tehničke specifikacije higrostatirane komore 19
Tablica 9 Otpor termometara u ovisnosti o temperaturi 23
Tablica 10 Individualni koeficijenti platinskih otporničkih termometara 24
Tablica 11 Budžet nesigurnosti umjeravanja termometara 26
Tablica 12 Oznake mjernih lokacija povezana s kanalima mjerne postaje 46
Tablica 13 Podaci o provedenom ispitivanju 46
Tablica 14 Rezultati ispitivanja komore pri postavljenoj temperaturi regulatora na 10 °C 47
Tablica 15 Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti pri postavljenoj temperaturi regulatora na 10 °C 48
Tablica 16 Rezultati ispitivanja komore pri postavljenoj temperaturi regulatora na 30 °C 49
Tablica 17 Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti pri postavljenoj temperaturi regulatora na 30 °C 50
Tablica 18 Rezultati ispitivanja komore pri postavljenoj temperaturi regulatora na 50 °C 51
Tablica 19 Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti pri postavljenoj temperaturi regulatora na 50 °C 52
Tablica 20 Rezultati ispitivanja komore pri postavljenoj temperaturi regulatora na 70 °C 53
Tablica 21 Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti pri postavljenoj temperaturi regulatora na 70 °C 54
Tablica 22 Rezultati ispitivanja komore korištenjem higrometra pri postavljenoj temperaturi regulatora 10 °C i relativnoj vlažnosti 50 % 56
Tablica 23 Utjecaj karakteristika komore na ukupnu mjernu nesigurnost pri postavljenoj temperaturi regulatora 10 °C i relativnoj vlažnosti 50 % 57
Tablica 24 Rezultati ispitivanja komore korištenjem higrometra pri postavljenoj temperaturi regulatora 30 °C i relativnoj vlažnosti 50 % 58
Tablica 25 Utjecaj karakteristika komore na ukupnu mjernu nesigurnost pri postavljenoj temperaturi regulatora 30 °C i relativnoj vlažnosti 50 % 59
Tablica 26 Rezultati ispitivanja komore korištenjem higrometra pri postavljenoj temperaturi regulatora 50 °C i relativnoj vlažnosti 50 % 60

Tablica 27 Utjecaj karakteristika komore na ukupnu mjernu nesigurnost pri postavljenoj temperaturi regulatora 50 °C i relativnoj vlažnosti 50%..... 61
Tablica 28 Rezultati ispitivanja komore korištenjem higrometra pri postavljenoj temperaturi regulatora 70 °C i relativnoj vlažnosti 50 %..... 62
Tablica 29 Utjecaj karakteristika komore na ukupnu mjernu nesigurnost pri postavljenoj temperaturi regulatora 70 °C i relativnoj vlažnosti 50 %..... 63

POPIS GRAFOVA

Graf 1 Prikaz ovisnosti temperature o otporu termometra s izračunatim individualnim karakteristikama 25
Graf 2 Prikaz temperature u svim mjernim točkama pri temperaturi 10 °C 47
Graf 3 Prikaz temperature u svim mjernim točkama pri temperaturi 30 °C 49
Graf 4 Prikaz temperature u svim mjernim točkama pri temperaturi 50 °C 51
Graf 5 Prikaz temperature u svim mjernim točkama pri temperaturi 70 °C 53

POPIS OZNAKA

OZNAKA	JEDINICA	OPIS
Φ,	%	relativna vlažnost zraka
$t$dp,	°C	temperatura točke rosišta
ti,	°C	temperatura u i-toj mjernoj točki u komori
$t$ref,	°C	temperatura u referentnoj mjernoj točki u komori
Δ$t$ref+,	°C	najveći pozitivni prostorni gradijent temperature
Δ$t$ref	°C	najveći negativni prostorni gradijent temperature
Δ$t$inhom+,	°C	najveći prostorni gradijent temperature
Δ$t$instab+,	°C	najveći pozitivni vremenski gradijent temperature
Δ$t$instab-,	°C	najveći vremenski gradijent temperature
hi ,	%rh	relativna vlažnost u i-toj mjernoj točki u komori
Δ$h$ref+,	%rh	najveći pozitivni prostorni gradijent relativne vlažnosti
Δ$h$ref-,	%rh	najveći negativni prostorni gradijent relativne vlažnosti
Δ$h$inhom,	%rh	najveći prostorni gradijent relativne vlažnosti
Δ$h$instab+,	%rh	najveći pozitivni vremenski gradijent relativne vlažnosti
Δ$h$instab-,	%rh	najveći pozitivni vremenski gradijent relativne vlažnosti
Δ$h$instab,	%rh	najveći vremenski gradijent relativne vlažnosti
Δ$t$ra$d$,	%rh	razlika temperatura zbog utjecaja zračenja
N		broj mjerenja
u		mjerna nesigurnost
U		standardna mjerna nesigurnost

DEFINICIJE

Higrostatirana komora je uređaj koji nam omogućuje postizanje točno određenih uvjeta temperature i relativne vlažnosti zraka u zatvorenom volumenu. Uvjeti temperature i vlažnosti koje se žele postići moraju biti unutar radnog područja komore. Kako bi se postigli željeni uvjeti unutar komore te minimiziralo vremensku i prostornu nehomogenost temperature i relativne vlažnosti, kao i odstupanja temperature i vlažnosti, izmjerene postavljenim mjernim sustavom, od zadane vrijednosti u korisnom volumenu koriste se različite tehnologije (toplinska izolacija, prisilna cirkulacija, presvlaka za zaštitu od utjecaja zračenja, i dr.). U komori se definira korisni volumen koji je omeđen mjernim pozicijama.

Mjerne pozicije su točke u prostoru korisnog volumena koji je potrebno ispitati. Na mjernoj poziciji je postavljen uređaj za mjerenje temperature ili vlage.

Korisni volumen je dio volumena komore omeđen mjernim pozicijama uređaja postavljenim za ispitivanje. Ovisno o odabiru mjernih pozicija korisni volumen može se značajno razlikovati od ukupnom volumena komore. Ispitivanje komore odnosi se samo na korisni volumen, dakle ne nužno na ukupni volumen komore.

Referentna mjerna pozicija je točka unutar korisnog volumena na temelju čijih se izmjerenih vrijednosti ,temperature i vlage, izračunavaju razlike u odnosu na vrijednosti izmjerene na drugim mjernim točkama. Određuje se na temelju geometrije komore te je to najčešće geometrijsko središte korisnog volumena.

1. UVOD

Higrostatirane komore omogućuju unutar svog zatvorenog radnog prostora postizanje uniformnih uvjeta s obzirom na temperaturu i vlažnost. Radni prostor higrostatirane komore najčešće je manjeg volumena od ukupnog volumena komore, a razlog tomu je postizanje što homogenijeg rasporeda temperature i vlažnosti.

Ovakve komore se koriste najčešće koriste u laboratorijima i industriji. Najčešća primjena u laboratorijima se odnosi na upotrebu za uspoređivanje očitanja prilikom umjeravanja termometara i higrometara, temperiranje senzora različitih namjena. Za industrijsku praksu higrostatirane komore su bitne s gledišta ispitivanja pouzdanosti električnih komponenti i senzora pri različitim temperaturnim uvjetima i uvjetima vlažnosti, također, služe i za ispitivanje regulacijskih karakteristika i odziva tih komponenti.

S obzirom na važnost zadaće koje komore obavljaju i zahtjeva za postizanje jednomjernih uvjeta s obzirom na temperaturu i relativnu vlažnost unutar njihovog radnog volumena, opravdana je potreba za ispitivanjem radnih karakteristika higrostatirane komore. Ispitivanje ovih karakteristika ima veliku važnost i u određivanju kvalitete komore, a time i laboratorija, te rezultati tih ispitivanja određuje primjenjivost komore za obavljanje pojedinog posla. Danas još ne postoji točno definiran proces ispitivanja karakteristika komora, stoga se ovim završnim radom želi opisati jedan od mogućih načina ispitivanja karakteristika higrostatiranih komora. Takav postupak bi trebao biti točan, siguran i ponovljiv i za ostale komore bez obzira na uvjete rada.

Kako bi ispitali karakteristike komore, potrebno je koristiti umjerene termometre. Umjeravanje termometara provodi se pomoću cirkulirajuće kupke. Vrsta kupke, oblik i veličina kupke ovisi o zahtjevima umjeravanja. Sredstvo cirkulacije unutar kupke također se može razlikovati, a to ovisi o potrebama korisnika s obzirom na željeni raspon temperatura umjeravanja. Tako se za umjeravanje pri niskim temperaturama koristi alkoholna kupka, pri visokim uljne kupke, dok se voda koristi u rasponu temperatura od 10 °C do 90 °C, te je to područje koje će i nama biti od važnosti za umjeravanje termometara korištenih u ovom završnom zadatku. Ova kupka je opremljena i mješačem vode za što homogeniju raspodjelu temperature u kupki te regulacijskim sustavom za održavanje postavljane temperature. Za potrebe ispitivanja karakteristika komore umjereno je 8 industrijskih termometara. Uz industrijske termometre, za ispitivanje karakteristike komore korištena su i dva etalonska. Termometri su umjereni na temperaturama 10 °C, 30 °C, 50 °C, 70 °C. Na temelju rezultata umjeravanja izračunati su individualni koeficijenti termometara te je procijenjena pripadna mjerna nesigurnost umjeravanja. Daljnje korištene metode dane su u nastavku završnog rada.

2. UMJERAVANJE TERMOMETARA I ISPITIVANJE HIGROSTATIRANE KOMORE

Svrha ispitivanja higrostatirane komore je određivanje karakteristika pri različitim temperaturnim režimima rada, pri određenoj relativnoj vlažnosti. Kako smo već napomenuli u Uvodu završnog rada, da ne postoji točno usvojena procedura ispitivanja komore. Tako proizvođači komora mogu u tehničkim specifikacijama navesti karakteristike komore u uvjetima koji neće odgovarati uvjetima rada u kojima će ju korisnik rabiti. Stoga laboratoriji, u svrhu osiguranja kvalitete usluge provodi vlastita ispitivanja komore u svrhu određivanja njihovih karakteristika.

Dvije karakteristika koje su od najvećeg značaja su:

- Prostorni gradijenti
- Vremenska stabilnost temperature i relativne vlažnosti zraka unutar radnog volumena komore.

Higrostatirana komora ispitivana je u temperaturnom području od 10 °C do 70 °C, s korakom od 20 °C, uz podešenu relativnu vlažnost na 50 %rh. Od rezultata se očekuje utvrđivanje nehomogenosti temperature zbog nesavršenosti medija i konstrukcije radnog volumena.

Kako bi higrostatiranu komoru mogli ispitati potrebno je zadovoljiti sljedeće uvjete:

- Komora treba imati ugrađene vlastite mjerne uređaje za temperaturu i vlažnost.
- Komora mora imati vlastitu upravljačku jedinicu za postavljanje vrijednosti temperature i vlažnosti zraka.
- Komora treba imati upute za korištenje s tehničkim podacima odobrenu od proizvođača komore.
- Komora treba imati tehničke specifikacije o ugrađenim senzorima, također moraju postojati podaci o poziciji senzora, izolaciji komore.
- U korisnom volumenu komore treba biti osiguran okolišni tlak.
- Komora mora osigurati ispitivanje u barem tri radne točke koje su unutar radnog područja komore.
- Ako se u korisnom volumenu pojave gubici disipacije taj utjecaj mora biti određen u vidu doprinosa mjernoj nesigurnosti u uvjetima ispunjenosti komore teretom.

3. KORIŠTENA OPREMA

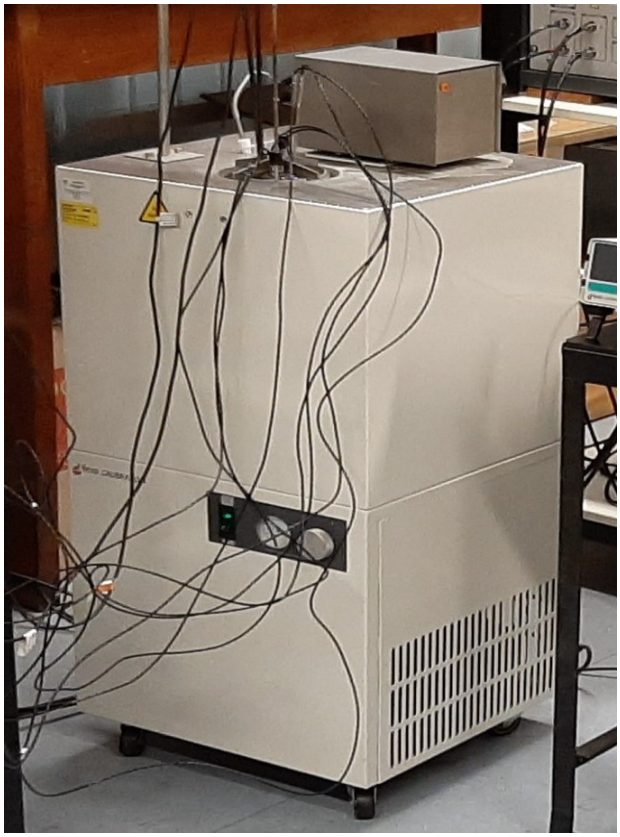
Korištena oprema prilikom izrade praktičnog dijela ovog završnog rada jest laboratorijska oprema Laboratorija za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

3.1 KUPKA (lab. TEKUP 11)

Ova termostatirana kupka korištena je za umjeravanje otporničkih termometara. Tehničke specifikacije kupke su:

Proizvođač	Heto Calibration	
Model	KB 22 – 1	
Temperaturno područje	voda	5 °C do 90 °C
Kapacitet radnog medija	8 litara	
Dimenzije	visina	1410 mm (960 mm)
	širina	450 mm
	dužina	415 mm
Dimenzije unutrašnjosti kupke	promjer	97 mm
	dubina	500 mm
Masa	115 kg	
Snaga	3 kW	
Napajanje	220 V, 50 Hz	

Tablica 1 Tehničke specifikacije kupke



Slika 1 Kupka Heto Calibration KB 22 – 1, lab. TEKUP 11

3.2 OTPORNIČKI TERMOMETRI

Za ispitivanje komore korišteni su platinski otpornički termometri. Prethodno smo ih umjerili postavljanjem u izotermalni blok (bakreni blok, kružnog presjeka s uzdužnim provrtima za postavljanje termometara) i istog u kupku. Umjeravanje je provedeno u temperaturnom području od 10 °C do 70 °C s korakom od 20 °C. Termometri se povezuju s otporničkim mostom preko multipleksora, s pomoću četiri žice. Za ispitivanje karakteristika komore korišteno je osam standardnih platinastih otporničkih termometara PT 100 – 385 te dva etalonska od kojih je jedan smješten na referentu mjernu poziciju (TEPOT 19), a drugi je korišten za određivanje utjecaja zračenja (TEPOT21).

Serijski broj termometra
1105SJT6
1105SA9G
1105SA9H
1105SA9I
1105SJT5
110529CN
1105Q7IW
1105SA9F
TEPOT 19
TEPOT 21

Tablica 2 Tablica serijskih brojeva korištenih industrijskih otporničkih termometara

Proizvođač	HART Scientific	
Model	5628	
Nominalni otpor	25.5 Ω	
Broj komada	2	
Dimenzije osjetnika	duljina	30 mm
Dimenzije zaštitne cijevi	Promjer	6.35 mm
	duljina	508 mm

Tablica 3 Tehničke specifikacije etalonskog termometra

3.3 HIGROMETAR

Za potrebe mjerenja vlažnosti unutar korisnog volumena komore korišten je higrometar General Eastern M2 sa senzorom rosišta D – 2 – SR. Higrometar ima mogućnost mjerenja temperature i rosišta u širokom području, a na temelju ovih podataka izračunava pripadnu relativnu vlažnost zraka, %rh. Higrometar se sastoji od pokazne jedinice, senzorom rosišta te platinastog otporničkog termometra.

Radno područje senzora rosišta	
Rosište	-40 °C do 85 °C
Temperatura okoliša	-15 °C do +93 °C
Tlak	1 do 20 bar
Radno područje instrumenta	
Temperature	**0 do 50 °C**
Vlage	**0 do 85 %rh**

Tablica 4 Tehničke specifikacije higrometra

3.4 MJERNA POSTAJA



Slika 2 Mjerna postaja – Multipleksor s upravljačkom jedinicom i otporničkim mostom

Za mjerenje otpora termometara, u ovom završnom radu, korištena je sljedeća oprema Laboratorija za procesna mjerenja:

- Multipleksor - ASL SB 158 (oznaka proizvođača) – EOMO50301 (laboratorijska oznaka)
- Višekanalna upravljačka jedinica – ASL SB 148/01 – EOMO50302
- Otpornički most – ASL F700 – EOMO50303

Tehnička specifikacija opreme:

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

Tablica 5 Tehničke specifikacije Multipleksora

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

Tablica 6 Tehničke specifikacije višekanalne upravljačke jedinice

Proizvođač	ASL	
Model	F 700	
Napajanje	240/220/120/100 Vac	
Frekvencija	50 – 60 Hz	
Dimenzije	visina	155 mm
	širina	520 mm
	dužina	466 mm
Masa	15 kg	
Radni uvjeti	0 °C – 30 °C, 10 % - 90 % RH	
Vrijeme mjerenja	10 sekundi za potpuni balans	

Tablica 7 Tehničke specifikacije Otporničkog mosta

Kako bi istim otporničkim mostom mogli mjeriti otpor više termometara, potrebno je bilo koristiti i multipleksor. Rad multipleksora zasniva se na principu da odabire jedan od više mogućih ulaznih kanala (u našem slučaju je 10) te pripadni termometar spaja na otpornički most.

Multipleksor je spojen na prijenosno računalo, te se pomoću računalnog programa izrađenog u programskom jeziku LabView kontrolira njegov rad te se istovremeno bilježe očitanja s otporničkog mosta. Uz bilježenje otpora termometara, računalni program izračunava i bilježi pripadne temperature.

3.5 HIGROSTATIRANA KOMORA

Predmet ispitivanja ovog završnog rada jest Heraeus – ova higrostratirana komora, točnije model Votsch HC 003. Ova komora omogućuje nam postizanje različitih radnih točaka s obzirom na temperaturu i vlažnost.

Proizvođač	Heraeus	
Model	Votsch HC 003	
Vanjske dimenzije	Visina [mm]	1840
	Širina [mm]	930
	Duljina [mm]	1365
Dimenzije radnog prostora	Visina [mm]	675
	Širina [mm]	575
	Duljina [mm]	550
Volumen radnog prostora, m^3	0,213	
Temperaturno radno područje	10 °C do 90 °C	
Radno područje vlage	30 %rh do 95 %rh	

Tablica 8 Tehničke specifikacije higrostatirane komore

Za puštanje u rad ove komore, prethodno je potrebno postići određene klimatske uvijete u prostoru u kojem je ona smještena. Kako bi komora normalno radila potrebno je u okolišu osigurati temperaturu u rasponu od 15 °C do 35 °C, te relativnu vlažnost zraka nižu od 75 %.

Komora ima vlastite sustave za grijanje i hlađenje, kao i sustav za ovlaživanje ili isušivanje zraka. Radnom prostoru pristupa se s prednje strane komore, a obložen je limovima od visoko kvalitetnog čelika. Sa stražnje strane radnog prostora nalazi se ventilator za miješanje zraka, kojim se nastoji ostvariti što homogenija raspodjela temperature unutar prostora. Senzor temperature nalazi se ispod donje površine radnog prostora. Sustav upravljanja postavljen je s vanjske prednje strane.

Sustav upravljanja sastoji se od mikrokontrolera i pokazne jedinice. Na pokaznoj jedinici može se postaviti željena temperatura i relativna vlažnost kao i pratiti aktualno stanje u komori. Sustav se može podesiti kako bi radio u automatskom ili ručnom načinu rada, te nam također omogućuje unošenje temperaturnih granica unutar kojih želimo da željena temperatura fluktuira.



Slika 3 Higrostatirana komora

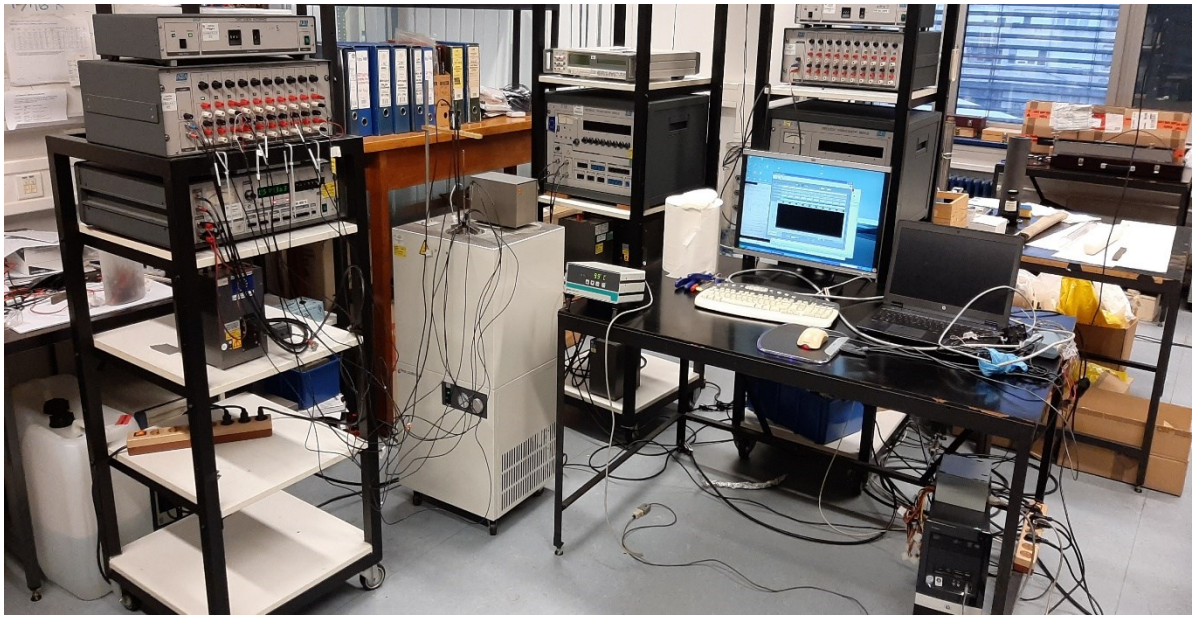
3.6 OSOBNO RAČUNALO

Osobno računalo se koristi za upravljanje multipleksorom te za bilježenje i preračunavanje očitanja otporničkog mosta. Bilježenje i preračunavanje podataka obavlja se pomoću programa razvijenog u Laboratoriju za procesna mjerenja, te je više puta potvrđeno da je njegovo korištenje daje sigurne i zadovoljavajuće podatke. Računalni program izmjerene podatke sprema u datoteku u Excel formatu.

4. UMJERAVANJE TERMOMETARA

Za ispitivanje karakteristika komore odabrali smo i dalje koristili 8 industrijskih otporničkih termometara te dva etalonska termometra. Umjeravanjem termometara svakom pojedinačno određujemo individualnu karakteristiku, odnosno korigiramo odstupanje, što poslije moramo uzeti u obzir prilikom ispitivanja karakteristika higrostatirane komore.

Umjeravanje termometara se provodilo u Laboratoriju za procesna mjerenja, te je za potrebe umjeravanja korištena oprema u vlasništvu Laboratorija. Oprema korištena za potrebe umjeravanja je termostatirana kupka (proizvođača Heto Calibration, laboratorijska oznaka TEKUP 11), čije su karakteristike prethodno ispitane te se vremenom pokazala kao pouzdanom, izotermalni blok, otpornički most te osobno računalo.



Slika 4 Oprema za provođenje umjeravanja

Umjeravanje se provodilo umetanjem termometara u izotermalni blok koji postavljamo u kupku. Korišteni medij za umjeravanje jest destilirana voda. Tijekom umjeravanja osigurana je stalna cirkulacija vode da bi se postigla što homogenija raspodjela temperature. Termometri su spojeni s otporničkim mostom, koji mjeri električni otpor termometra. Izmjereni otpor bilježi se pomoću računala s odgovarajućim računalnim programom te se preračunava u odgovarajuću temperaturu. Otpori i temperature se spremaju u obliku Excel datoteke – a što nam omogućuje jednostavniju daljnju obradu podataka. Daljnja obrada podataka uključuje i određivanje individualnih karakteristika termometara korištenjem metode najmanjih kvadrata.



Slika 5 Izotermalni blok za umjeravanje termometara

Temperaturni raspon rada higrostatirane komore jest od 10 °C do 90 °C, a u skladu s tim su određene i temperaturne točke na kojima ćemo provodit umjeravanje. Temperaturne točke umjeravanja su 10 °C, 30 °C, 50 °C i 70 °C. Važno je napomenuti kako, zbog intenzivnog ishlapljivanja radnog medija, umjeravanje nije bilo moguće provesti na temperaturnoj točki 90 °C. U protivnom smo trebali umjeravanje provesti korištenjem sintetskog ulja, što nije bilo praktično. Temperaturu u kupki bilježili smo s dva etalonska termometra.

Zabilježena očitanja otpora i temperature za određene temperaturne točke prikazana su u tablici. Potrebno je napomenuti da su u tablici dane vremenski uprosječene vrijednosti temperatura. Kao period umjeravanja odabrali smo 30 minuta, od trenutka stabilizacije temperature.

4.1 REZULTATI UMJERAVANJA

Oznaka kanala na koji je spojen otpornički termometar – PT 100 - 385	**CH0**	**CH1**	**CH3**	**CH4**	**CH5**
Temperatura, °C	*Otpor, Ω*				
9,90	103,87	103,90	103,87	103,91	103,89
30,08	111,73	111,73	111,73	111,76	111,74
50,20	119,50	119,50	119,51	119,54	119,53
70,28	127,20	127,20	127,21	127,25	127,21
Oznaka kanala na koji je spojen otpornički termometar – PT 100 - 385	**CH6**	**CH7**	**CH8**		
Temperatura, °C	*Otpor, Ω*				
9,9044	103,89	103,85	103,88		
30,0753	111,74	111,68	111,73		
50,1967	119,53	119,45	119,51		
70,3198	127,24	127,15	127,20		

Tablica 9 Otpor termometara u ovisnosti o temperaturi

Pomoću izmjerenih otpora, koji su vremenski uprosječeni, za odabrane temperaturne točke možemo, pomoću metode najmanjih kvadrata, odrediti njihove individualne karakteristike. Rješenja koja ćemo dobiti su u obliku jednadžbe u kojima će otpor pojedinog termometra biti funkcija temperature.

4.2 IZRAČUN INVIDUALNIH KOEFICIJENATA TERMOMETARA

Funkcija, koja se uobičajeno koristi za opis odnosa otpora i temperature jednadžbe za platinske otporničke termometre, jest Callendar Van – Dusen - ova jednadžba. Callendar Van – Dusen - ova jednadžba služi i kao interpolacijski polinom između diskretnih točaka:

$$R(T) = R_0 * [\,1 + A * T + B * T^2 + C * (T - 100) * T^3]$$

Gdje su:

- R_0 – otpor termometra na 0 °C

- T – temperatura termometra

- A, B, C – individualni koeficijenti termometara

Individualni koeficijenti izračunati su metodom najmanjih kvadrata u računalnom programu razvijenom u Laboratoriju za procesna mjerenja.

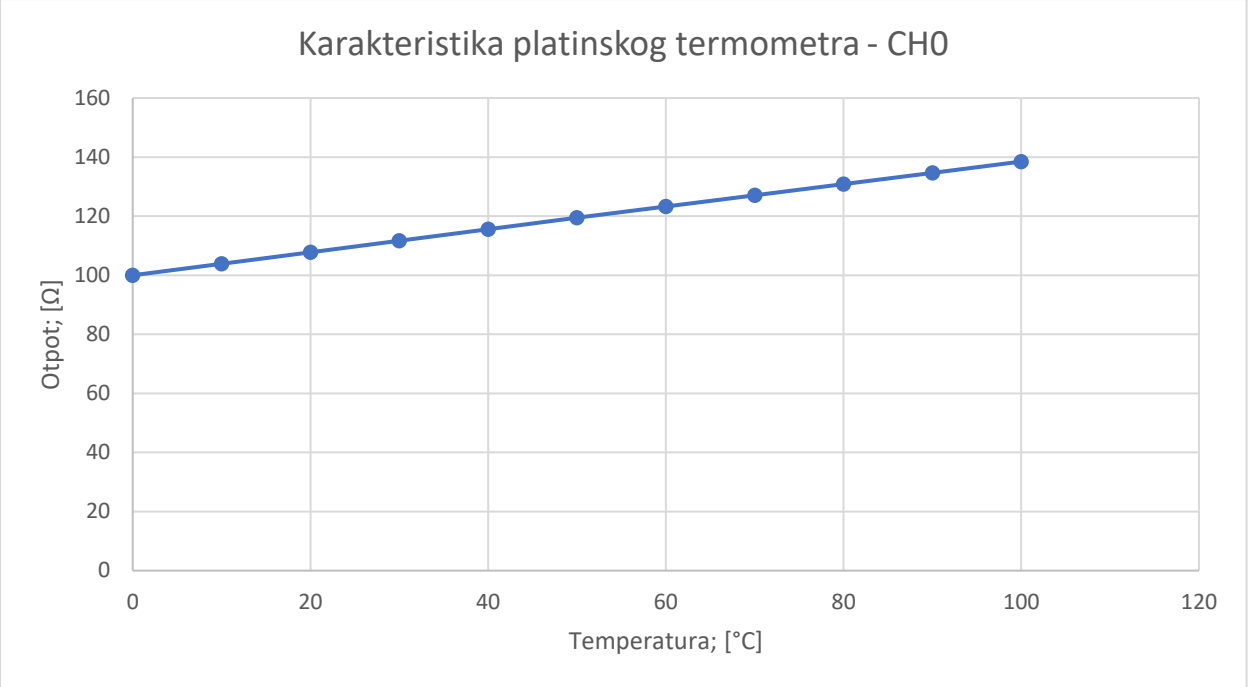
Budući da za potrebe ispitivanja komore nije potrebno umjeravati termometra na temperaturama nižim od 0 °C, individualni koeficijent C možemo u skladu s normom ISO-IEC 60751, zanemariti. Time ćemo dobiti novi izraz polinoma:

$$R(T) = R_0 * [\,1 + A * T + B * T^2]$$

Izračunate vrijednosti otpora termometra R_0 (na temperaturi 0 °C) te koeficijenata A i B za svaki pojedinačni platinski otpornički termometar dane su u tablici.

Oznaka kanala	*Koeficijenti*		
	Ro	**A**	**B**
CH0	99,99717	0,003922	-7,3E-07
CH1	100,0344	0,003907	-6,1E-07
CH3	99,99595	0,003923	-7,2E-07
CH4	100,0281	0,003922	-7E-07
CH5	99,99968	0,003934	-8,9E-07
CH6	100,0108	0,003922	-6,9E-07
CH7	99,9888	0,003907	-6E-07
CH8	99,99843	0,003924	-7,6E-07

Tablica 10 Individualni koeficijenti platinskih otporničkih termometara



Graf 1 Prikaz ovisnosti temperature o otporu termometra s izračunatim individualnim karakteristikama

Na grafu je prikazan izgled karakteristike platinskog otporničkog termometra spojenog na otpornički most preko kanala CH0, u nastavku je dana Callendar Van – Dusen - ova jednadžba s uvrštenim iznosom R_0 te individualnim koeficijentima A i B.

$$R = 99{,}99717 * [1 + 3{,}922 * 10^{-4} * T - 3{,}90159 * 10^{-6} * T^2$$

4.3 PROCJENA NESIGURNOSTI UMJERAVANJA

Nesigurnost određivanja temp. zone kontrolirane temperature											
Tip	Izvor nesigurnosti	Procjena		Nesigurnost		Razdioba	Koeficijent		Doprinos	
A	Očitanje etalona	9,9043616	°C	0,0001	°C	normalna (1σ)	1,0	[-]	0,1	mK
B	Umjeravanje etalona	0,00	°C	0,0060	°C	normalna (2σ)	1,0	[-]	3,0	mK
	Drift etalona	0,00	°C	0,0030	°C	pravokutna	1,0	[-]	1,7	mK
	Umjeravanje mosta	0,00	mΩ	0,12	mΩ	normalna (2σ)	10,2	°C/Ω@t_S	0,6	mK
	Rezolucija mosta	0,00	mΩ	0,10	mΩ	pravokutna	10,2	°C/Ω@t_S	0,3	mK
	Gradijenti	0,00	°C	0,0748	°C	normalna (1σ)	1,0	[-]	74,8	mK
A&B	DUT temperature	9,9044	°C	Standardna nesigurnost (1σ)					0,0749	°C
Nesigurnost objekta umjeravanja		$t_{cal:}$		9,9044	°C					
Tip	Izvor nesigurnosti	Procjena		Nesigurnost		Razdioba	Koeficijent		Doprinos	
A	Očitanje DUT-a	103,8892	Ω	0,00006	Ω	normalna (1σ)	1,0	[-]	0,06	mΩ
B	Umjeravanje mosta	0,00	mΩ	0,12	mΩ	normalna (2σ)	1,0	[-]	0,06	mΩ
	Rezolucija mosta	0,00	mΩ	0,10	mΩ	pravokutna	1,0	[-]	0,03	mΩ
	Utjecaj zonek.t.	0,00	°C	0,0749	°C	normalna (1σ)	0,385	Ω/°C@t_{cal}	28,83	mΩ
A&B	DUT Resistance	103,8892	Ω	Uncertainty (1σ)					28,8302	mΩ
									0,075	°C
C	Interpolacija	0,00	mΩ	0,000	mΩ	pravokutna	1,00	[–]	0,00	mΩ
ABC	otpor DUT -a	103,8892	Ω	Nesigurnost (1σ)					28,8302	mΩ
									0,0749	°C
				Nesigurnost (2σ) - 95 %					57,6604	mΩ
									0,1498	°C

Tablica 11 Budžet nesigurnosti umjeravanja termometara

5. METODA ISPITIVANJA HIGROSTATIRANE KOMORE

Za potrebe ispitivanje karakteristika higrostatirane komore korištena je uputa: Calibration of climatic and thermostated chambers CP – VL03, izrađena u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Zagreb. Uputa je izrađena u skladu s uputom DKD – R 5 – 7, Calibration of Climatic Chambers.

Ispitivanje se provodi u korisnom volumenu komore te će dobiveni rezultati biti primjenjivi samo na taj korisni volumen. Za ispitivanje se koristi minimalno devet industrijskih termometara, jednan etalonski te higrometar točke rose s hlađenim ogledalom. Ispitivanjem će se obuhvatiti:

- Korekcija mjernog uređaja komore, tj. razliku između temperature/vlage mjerene etalonima i pokazivača komore.
- Prostorna nehomogenost temperature/vlage u praznom korisnom prostoru.
- Vremenska nehomogenost temperature/vlage u praznom korisnom prostoru.
- Utjecaj zračenja.
- Utjecaj vlage na rezultate.

5.1 TEMPERATURE ISPITIVANJA

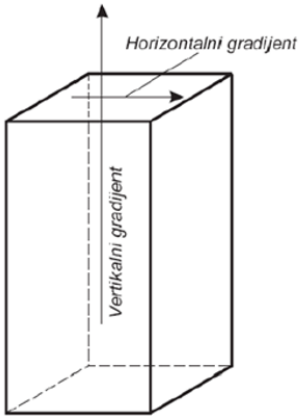
Prije početka ispitivanja potrebno je odrediti temperaturne točke ispitivanja komore. Mogući temperaturni radni raspon komore je od 10 °C do 90 °C, te relativne vlažnosti od 30 % do 95 %. Za relativnu vlažnost određena je fiksna vrijednost od 50 %, dok za temperature je uzet korak od 20 °C, pa stoga definirane mjerne točke su:

1. 10 °C, 50 %rh
2. 30 °C, 50 %rh
3. 50 °C, 50 %rh
4. 70 °C, 50 %rh

Period ispitivanja za svaku mjernu točku je 45 minuta.

5.2 TEMPERATURNI GRADIJETNI

Temperaturni gradijent predstavlja promjenu temperature u smjeru normale na izotermnu plohu. Temperaturni gradijent se prikazuje kao vektor okomit na izotermnu plohu, s pozitivnim predznakom u slučaju rasta temperature, s negativnim predznakom u slučaju pada temperature. Numerički izraženo, temperaturni gradijent jednak je derivaciji temperature po normali n. Temperaturni gradijent može se rastaviti na vertikalnu i horizontalnu komponentu.



Slika 6 Temperaturni gradijenti

Numerički izraženo glasi:

$$grad\ \vartheta = \overrightarrow{n_0} * \lim_{n\to\infty} \frac{\Delta\vartheta}{\Delta n} = \overrightarrow{n_0} * \frac{\partial\vartheta}{\partial n}$$

n_0 – jedinični vektor okomit na izotermnu plohu i pozitivno je definiran u smjeru povećanja temperature

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

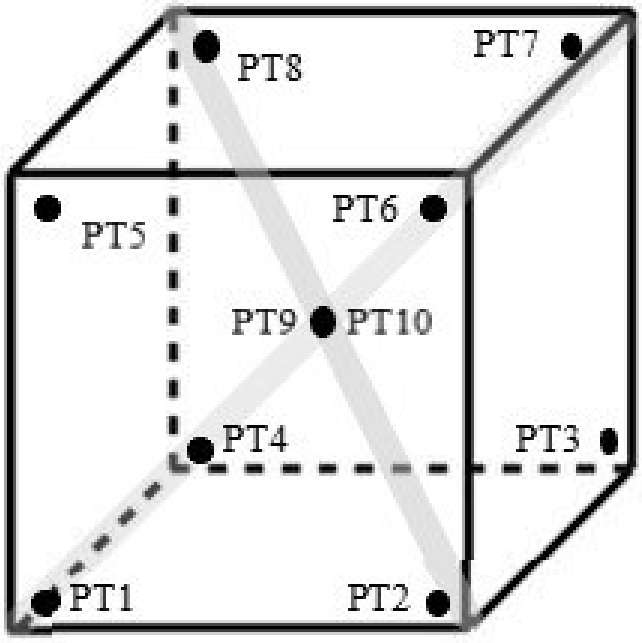
5.3 ISPITNA ZONA

Ispitna zona je zamišljeni prostor unutar radnog volumena komore, a definira se pozicijama termometara unutar tog volumena. Ispitna zona ispunjena je radnim medijem, u našem slučaju zraka te u njoj djeluje atmosferski (okolni) tlak. Formiranje ispitne zone unaprijed se definira na temelju danih uputa, iskustvenih preporuka i u skladu s namjenom komore. Za formiranje ispitne zone za komoru ispitivanu u ovom završnom radu korišteno je 10 otporničkih termometara koje je prethodno bilo potrebno umjeriti.

5.4 ISPITIVANJE PROSTORNE NEHOMOGENOSTI

Prostorna nehomogenost temperature ili relativne vlažnosti određuje se kao najveće odstupanje temperature ili relativne vlažnosti na mjernoj poziciji naspram referentne točke, za koju se najčešće uzima središte radnog volumena.

Termometri se postavljaju u kutove radnog prostora čime tvore ispitnu zonu, najčešće se postavljaju u kutove ispitne zone te ih potrebno udaljiti od stijenke za minimalno pet centimetara. Osam otporničkih termometara smo pričvrstili plastičnim kopčama, dok smo etalonski termometar i termometar za mjerenje utjecaja zračnosti pričvrstili u radni volumen pomoću metalne rešetke. Higrometar je, također, pozicioniram pomoću metalne rešetke u referentnoj točki.



Slika 7 Raspored termometara u radnom volumenu komore

Nehomogenost se određuje na svim zadanim ispitnim vrijednostima temperature i relativne vlažnosti. Nehomogenost temperature se određuje u temperaturnom rasponu od 10 °C do 70 °C, uz konstantnu vrijednost relativne vlažnosti od 50 %rh.

Prostorna nehomogenost relativne vlažnosti može se odrediti tako da se rosište mjeri samo u referentnoj točki te se pomoću tog podatka i temperatura izmjerenih na ostalim mjernim pozicijama izračunaju pripadne relativne vlažnosti. Uvođenjem pretpostavke o homogenoj distribuciji molekula vodene pare u ispitnom volumenu, odnosno jednakoj temperaturi rosišta, možemo izračunati relativnu vlažnost u svim mjernim pozicijama koristeći se temperaturama izmjerenim na tim pozicijama.

5.5 ISPITIVANJE VREMENSKE NESTABILNOSTI

Vremenska nestabilnost temperature i relativne vlažnosti određuje se bilježenjem njihove vremenske varijacije u periodu od minimalno 30 minuta nakon što se postigne stabilno stanje. Stabilno stanje se definira kao stanje u kojem se varijacije temperature i relativne vlažnosti u odnosu na njihovu srednju vrijednost u određenom vremenskom periodu mogu smatrati konstantnima.

Za mjerenje vremenske nestabilnosti potrebno je zabilježiti barem 30 očitanja u određenom vremenskom razdoblju, minimalno 30 minuta. Razmak između bilježenja očitanja može biti različit ili konstantan. Ispitivanje vremenske stabilnosti temperature potrebno je barem provesti u središtu ispitnog volumena, tj. u referentnoj točki, za svaku ispitnu temperaturu i relativnu vlažnost.

6. UPUTE I SMJERNICE ZA ISPITIVANJE

6.1 OSNOVNI PODACI O UPUTI

Svrha upute Calibration of climatic and thermostated chamber, izrađrene u Laboratoriju za procesna mjerenja, jest ispitivanje higrostatiranih i termostatiranih komora. Cilj ove upute jest:

- određivanje odstupanja pokazivača komore ili razlika između referentne mjerne lokacije i pokazivača komore
- određivanje prostorne nehomogenosti u praznom korisnom volumenu
- određivanje vremenske nestabilnosti u praznom korisnom volumenu
- određivanje utjecaja zračenja (samo za ispitivanje temperatura zraka)
- određivanje utjecaja tereta u prostoru mjerenja tako da se uspoređuje napunjeni i prazni korisni prostor, određuje se samo na zahtjev naručitelja te u ovom završnom radu neće ga biti potrebno ispitivati.

Ova uputa je usklađena s uputom DKD – R 5 – 7.

6.2 POTREBNA OPREMA

Potrebna oprema za provođenje ispitivanja po navedenoj uputi jest:

- Standardni digitalni termometar prikladan za korištenje s termoparovima i platinskim otporničkim termometrima, koji može istovremenom bilježiti podatke s deset kanala
- devet termoparova ili platinskih otporničkih termometara,
- jedan etalonski termometar,
- jedan termopar ili otpornički platinski termometar s zaštitom od zračenja,
- standardni higrometar (jedan ako je vlažna prostorna homogenost temperaturno postignuta, devet ako je relativna vlažnost mjerena u svakoj mjernoj točki),
- uređaji za praćenje uvjeta okoliša i drugi pomoćni uređaji.

6.3 UVJETI ISPITIVANJA

U ispitivanjima, kada postoji temperaturni raspon ili raspon vlage u kojem je potrebno bilježiti podatke, ispitivanje je potrebno provesti barem na sljedećim razinama temperature ili vlage:

- donja granica radnog područja,

- sredina radnog područja,

- gornja granica radnog područja.

Za bolji uvid u karakteristike ispitivane komore te njihove promjene mogu biti izabrane i dodatne temperature ili vlažnosti. Ako je raspon ispitivanja uzak ili ako je ispitivani prostor korišten samo za određene temperature, ispitivanje se može provesti na dvije ili barem jednoj temperaturi.

6.4 PRIPREME ZA MJERENJE

Kako bi mogli provesti postupak ispitivanja komore, ispitivač prethodno mora:

- Postaviti uređaje za mjerenje uvjeta okoline u okruženju ispitivane komore i pričekati barem 15 minuta da se mjerni uređaji stabiliziraju.
- Pregledati higrostatiranu komoru i procijeniti može li se ispitivanje provesti sigurno.
- Ispuniti prvi dio izvješća o ispitivanju popisivanjem tehničkih podataka o opremi koji mogu utjecati na mjernu nesigurnost.
- Popisati podatke i specifikacije o komori i nacrtati skicu korisnog volumena komore, unutar skice je potrebno nacrtati i pozicije termometara koje je potrebno odabrati u skladu s DKD – R 5 – 7:
    - Za higrostatirane komore s korisnim volumenom manjim od 2000 litara, središnja točka tj. referentna točka označava se kao točka br. 1, dok točke br. 2 – 8 postavlja u kutovi komore na udaljenost od L/10, gdje je L udaljenost od bliske stijenke do one udaljenije. Udaljenost između mjernog uređaja i stijenke ne smije nikad bi trebao biti nikad manji od 5 cm.
- Pripremiti digitalni višekanalni termometar za mjerenje i postaviti mjerne uređaje u ispitivanu komoru.

- Provjeriti odgovaraju li koeficijenti u postavkama višekanalnog digitalnog termometra termometrima postavljenim u mjernim lokacijama.
- Postaviti devet termometara u predviđene pozicije unutar komore i jedan termometar sa zaštitom od utjecaja zračenja, koji bi trebao biti udaljen od 2 – 3 cm od referentne točke.
- Postaviti higrometar na mjernu poziciju, što bliže referentnoj točki.
- Zatvoriti higrostatiranu komoru kako bi ispitivanje moglo započeti.

7. TIJEK ISPITIVANJA

Ispitivač postavlja vrijednosti temperature i relativne vlažnosti na odabrane ispitne točke i zapisuje vrijeme početka ispitivanja i uvjete okoline. Potrebno je spomenuti da se ispitivanje provodi kada je radni volumen komore prazan.

7.1 MJERENJE PROSTORNE HOMOGENOSTI I UTJECAJA RADIJACIJE

Za ispitivanje prostorne homogenosti i utjecaja radijacije koristi se 8 platinskih otporničkih termometara, jedan etalonski termometar te jedan termometar sa zaštitom od utjecaja zračenja. Digitalni višekanalni termometar mjeri i bilježi sve temperaturne vrijednosti. Mjerenje se provodi u praznoj komori.

Relativna vlažnost se mjeri samo u referentnoj točki, ili u blizini referentne točke. U tom slučaju smatra se da je apsolutna vrijednost vlažnosti u cijelom korisnom volumenu komore konstantna, dok se nehomogenost relativne vlažnost mjeri, tj. računa prema prostornoj nehomogenosti temperature. U isto vrijeme kada se mjeri i bilježi temperatura, bilježi se i relativna vlažnost. Nakon što se postigne približno stabilno stanje (temperatura i relativna vlažnost u svakoj ispitnoj točki varira manje od očekivane mjerne nesigurnosti) mjerenje može započeti. Mjerenje traje 10 minuta. Bilježenje podataka potrebno je provoditi, najmanje, svakih 60 sekundi. Nakon što je završeno bilježenje podataka, izmjereni podaci o temperaturi i vlažnosti spremaju se u Excel – ovu datoteku.

7.2 VREMENSKA NESTABILNOST

Za mjerenje vremenske nestabilnosti koristi se 9 otporničkih termometara i jedan etalonski termometar. Digitalni višekanalni termometar prati i bilježi sve temperaturne vrijednosti te se mjerenje provodi u praznom korisnom ispitnom volumenu.

Za mjerenje relativne vlažnosti koristi se jedan higrometar postavljen u referentu točku prostora ili što bliže njoj. U tom slučaju pretpostavlja se da je apsolutna vlažnost homogena u korisnom prostoru komore te da je vremenska nestabilnost relativne vlažnosti uzrokovana temperaturnom nestabilnošću. U isto vrijeme se bilježe podaci o temperaturi i relativnoj vlažnosti. Nakon što se postigne približno stabilno stanje (temperatura i relativna vlažnost u svakoj ispitnoj točki varira manje od očekivane mjerne nesigurnosti) mjerenje može započeti. Digitalni višekanalni termometar je programiran kako bi bilježio temperaturu i srednju vrijednost temperatura u svakoj točki mjerenja. Mjerenje traje 30 minuta. Vrijednosti vlage te njezina srednja vrijednost, također, se bilježe tijekom tog perioda. Tijekom trajanja mjerenja potrebno je bilježiti podatke, najmanje, svakih 60 sekundi. Nakon što je završeno bilježenje podataka, izmjereni podaci o temperaturi i vlažnosti spremaju se u Excel – ovu datoteku.

8. OBRADA REZULTATA MJERENJA

8.1 PROSTORNA NEHOMOGENOST

Prostorna nehomogenost određena je najvišim odstupanjem temperature i relativne vlažnosti, na nekoj mjernoj točki unutar korisnog volumena, od temperature i relativne vlažnosti na referentnoj mjernoj točki.

8.1.1 PROSTORNA NEHOMOGENOST TEMPERATURE

Vremenski osrednjena temperatura na i – toj poziciji definira se kao:

$$t_i = \frac{1}{K} * \sum_{j=1}^{K} t_{i,j} \ (i = 1,2, \dots . N)$$

Najveći pozitivni i najveći negativni prostorni gradijenti temperature između jedne od mjernih lokacija i referentne mjerne lokacije su:

$$\Delta t_{ref+} = \max\left[\left(t_i - t_{ref}\right)(i = 1,2, \dots, N)\right]$$

$$\Delta t_{ref-} = \max\left[\left(t_{ref} - t_i\right)(i = 1,2, \dots, N)\right]$$

Prostorna nehomogenost temperaturna:

$$\delta t_{in\ hom} = \max\left[\left(\Delta t_{ref+}, \Delta t_{ref-}\right)\right]$$

Nesigurnost prostorne nehomogenosti temperature:

$$u(\delta t_{in\ hom}) = \frac{1}{\sqrt{3}} * \delta t_{in\ hom}$$

8.1.2 PROSTORNA NEHOMOGENOST VLAGE

8.1.2.1 IZMJERENE VRIJEDNOSTI VLAGE

Vremenski osrednjena vrijednost relativna vlage na i – toj lokaciji definira se kao:

$$h_i = \frac{1}{K} * \sum_{j=1}^{K} h_{i,j} (i = 1,2, \dots N)$$

Najveći pozitivni i najveći negativni prostorni gradijenti temperature između jedne od mjernih lokacija i referentne mjerne lokacije su:

$$\Delta h_{ref+} = \max\left[\left(h_i - h_{ref}\right)(i = 1,2, \dots, N)\right]$$

$$\Delta h_{ref-} = \max\left[\left(h_{ref} - h_i\right)(i = 1,2, \dots, N)\right]$$

Prostorna nehomogenost temperaturna:

$$\delta h_{in\ hom} = \max\left[\left(\Delta h_{ref+}, \Delta h_{ref-}\right)\right]$$

Nesigurnost prostorne nehomogenosti temperature:

$$u(\delta h_{in\ hom}) = \frac{1}{\sqrt{3}} * \delta h_{in\ hom}$$

8.1.2.2 TEMPERATURNO INDUCIRANA RELATIVNA VLAŽNOST

Ako se relativna vlažnost mjeri samo u referentnoj točki, relativna vlažnost drugih mjernih pozicija može se računati korištenjem formule za relativnu vlažnost:

$$h_{i,j} = \frac{e_w(t_{dp,j})}{e_w(t_{i,j})}$$

Gdje je:

- $t_{dp,j}$ = točka rosišta u j – tom vremenskom trenutku,

- $t_{i,j}$ = izmjerena temperatura zraka na i – toj mjernoj lokaciji u j – tom mjernom trenutku.

Tlak pare $e_w(t)$ može se računati za svaku temperaturu prema Sonntag – ovoj formuli:

$$\ln e_w(t) = a * t^{-1} + b + c * t + d * t^2 + e * \ln t$$

Gdje je:

- a = -6096,9385, b = 16,635794, c = -2,711193*10^{-2}, d = -1,673952*10^{-5}, e = -2,133502.

Drugi način određivanja maksimalne prostorne nehomogenosti relativne vlažnosti:

$$\delta h_{in\ hom} = \left| \frac{e_w(t_{dp})}{e_w(t_{ref})} \left[1 - \frac{e_w(t_{ref})}{e_w(t_{ref} + \delta t_{in\ hom}} \right] \right|$$

$$u(\delta h_{in\ \mathrm{hom}}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{e_w(t_{dp})}{e_w(t_{ref})} \left[1 - \frac{e_w(t_{ref})}{e_w(t_{ref} + \delta t_{in\ hom}} \right] \right|$$

8.2 VREMENSKA NESTABILNOST

Vremenska nestabilnost određena je iz snimljenih vremenskih odstupanja temperature i relativne vlažnosti, u jednoj referentnoj ili više drugih točaka, tijekom perioda od barem 30 minuta nakon što je postignuto približno stabilni uvjeti.

8.2.1 VREMENSKA NESTABILNOST TEMPERATURE

Vremenski osrednjena temperatura na i – toj lokaciji definira se kao:

$$t_i = \frac{1}{K} * \sum_{j=1}^{K} t_{i,j} \; (i = 1,2, \ldots . N)$$

Najveći pozitivni i najveći negativni vremenski gradijent temperature u svim mjernim točkama je dan izrazom:

$$\Delta t_{instab+} = \max\left[\left(t_i - t_{i,j}\right)(i = 1,2, \ldots, N, j = 1,2, \ldots, K)\right]$$

$$\Delta t_{instab-} = \max\left[\left(t_{i,j} - t_i\right)(i = 1,2, \ldots, N, j = 1,2, \ldots, K)\right]$$

Vremenska temperaturna nestabilnost:

$$\delta t_{instab} = \max[\Delta t_{instab+}, \Delta t_{instab-}]$$

Nesigurnost zbog postojanja vremenske nestabilnosti temperature:

$$u(\delta t_{instab}) = \frac{1}{\sqrt{3}} * \delta t_{instab}$$

8.2.2 VREMENSKA NESTABILNOST VLAGE

8.2.2.1 IZMJERENA VLAŽNOST

Vremenski osrednjena relativna vlažnost na i – toj poziciji definira se kao:

$$h_i = \frac{1}{K}\sum_{j=1}^{K} h_{i,j}(i = 1,2, \dots N)$$

Najveći pozitivni i najveći negativni vremenski gradijent relativne vlažnosti u svim mjernim točkama je dan izrazom:

$$\Delta h_{instab+} = \max\left[\left(h_i - h_{i,j}\right)(i = 1,2, \dots, N, j = 1,2, \dots, K)\right]$$

$$\Delta h_{instab-} = \max\left[\left(h_{i,j} - h_i\right)(i = 1,2, \dots, N), j = 1,2, \dots, K\right]$$

Vremenska nestabilnost relativne vlažnosti: $\delta h_{instab} = \max[\Delta h_{instab+}, \Delta h_{instab-}]$

Nesigurnost zbog vremenske nestabilnosti relativne vlažnosti:

$$u(\delta h_{instab}) = \frac{1}{\sqrt{3}} * \max|\delta h_{instab}|$$

8.2.2.2 TEMPERATURNO INDUCIRANA RELATIVNA VLAŽNOST

Ako se relativna vlažnost mjeri samo u referentnoj točki, relativna vlažnost drugih mjernih pozicija može se računati korištenjem formule za relativnu vlažnost:

$$h_{i,j} = \frac{e_w(t_{dp,j})}{e_w(t_{i,j})}$$

Gdje je:

- $t_{dp,j}$ = točka rosišta u j – tom vremenskom trenutku,

- $t_{i,j}$ = izmjerena temperatura zraka na i – toj mjernoj lokaciji u j – tom mjernom trenutku.

U tom slučaju vremenska nestabilnost relativne vlažnosti može se računati prema formuli:

$$\delta h_{instab} = \max\left|h_i - h_{i,j}\right|$$

Tlak pare $e_w(t)$ može se računati za svaku temperaturu prema Sonntag – ovoj formuli:

$$\ln e_w(t) = a * t^{-1} + b + c * t + d * t^2 + e * \ln t$$

Gdje je:

- a = -6096,9385, b = 16,635794, c = -2,711193*10^{-2}, d = -1,673952*10^{-5}, e = -2,133502.

8.3 UTJECAJ ZRAČENJA

Utjecaj zračenja definira se kao:

$$|\delta t_{rad}| \leq \max|t_{ref} - t_{ref,shield}|$$

Standardna nesigurnost zbog utjecaja radijacije je:

$$u(\delta t_{rad}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \max|t_{ref} - t_{ref,shield}|$$

8.4 NESIGUROST STANDARDNIH MJERNIH UREĐAJA

8.4.1 TEMPERATURNIH MJERNIH UREĐAJA

$$\delta t_{std} = \delta t_{cal} + \delta t_{drift}$$

$t_{i,std}\Delta t_{i,std}$: temperature mjerenje s standardnim termometrom na svim mjernim pozicijama (i=1 … N)

δt_{cal}: odstupanje termometra utvrđeno umjeravanjem.

δt_{drift}: klizanje termometra koje se procjenjuje iz povijesti umjeravanja termometra.

8.4.2 UREĐAJA ZA MJERENJE VLAGE

$$\delta h_{std} = \delta h_{cal} + \delta h_{drfift}$$

$h_{std}, \delta h_{std}$: relativna vlažnost mjerena sa standardnim higrometrom za sve mjerne lokacije (i = 1 … N).

δh_{cal}: odstupanje higrometra utvrđeno umjeravanjem, iščitava se iz potvrde o umjeravanju.

δh_{drift}: klizanje higrometra koje se procjenjuje iz povijesti umjeravanja higrometra.

8.5 ODSTUPANJE TEMPERATURE POSTAVLJENE NA REGULATORU KOMORE

$$\Delta t_{set} = t_{set} - t_{Std} + \delta t_{Std} + \delta t_{instab} + \delta t_{inhom} + \delta t_{rad} + \delta t_{res}$$

Δt_{set}: odstupanje temperature postavljene na regulatoru komore u odnosu na stvarnu temperaturu u sredini ispitivane komore

t_{set}: temperatura postavljena na regulatoru komore

t_{Std}: temperatura izmjerena etalonskim termometrom smještenim u ispitivanu komoru.

δt_{Std}: korekcija temperature izmjerene etalonskim termometrom smještenim u sredini ispitivane komore.

δt_{instab}: utjecaj nestabilnost temperature ispitivane komore.

δt_{inhom}: utjecaj prostorne nehomogenosti ispitivanoj komori (u odnosu na temperaturu u središtu tog volumena)

δt_{rad}: utjecaj zračenja na temperaturu izmjerenu etalonskim termometrom smještenim u sredini ispitivane komore

δt_{res}: utjecaj rezolucije regulatora temperature ispitivane komore. Mjerna nesigurnost se izračunava preko pravokutne razdiobe.

$$\Delta h_{set} = h_{set} - h_{Std} + \delta h_{Std} + \delta h_{instab} + \delta h_{inhom} + \delta t_{res}$$

Δh_{set}: odstupanje relativne vlažnosti postavljene na regulatoru komore u odnosu na stvarnu relativnu vlažnost u referentnoj točki ispitivane komore.

h_{set}: relativna vlažnost postavljena na regulatoru ispitivane komore.

h_{Std}: relativna vlažnost izmjerena higrometrom postavljenim u referentnu točku ispitivane komore.

δh_{Std}: korekcija relativne vlažnosti izmjerene etalonskim termometrom postavljenim u referentnu točku ispitivane komore.

δh_{instab}: utjecaj vremenske nestabilnosti relativne vlažnosti u ispitivanoj komori.

δh_{inhom}:utjecaj prostorne nehomogenosti relativne vlažnosti u ispitivanoj komori.

δh_{res}, utjecaj rezolucije regulatora na ispitivanoj komori.

8.6 IZRAČUN DOPRINOSA MJERNOJ NESIGURNOSTI

$$U(t)_{k=1} = 1 * \sqrt{u_{cal}^2 + u_{drift}^2 + u_{instab}^2 + u_{inhom}^2 + u_{rad}^2 + u_{res}^2}$$

$$U(t)_{k=2} = 2 * \sqrt{u_{cal}^2 + u_{drift}^2 + u_{instab}^2 + u_{inhom}^2 + u_{rad}^2 + u_{res}^2}$$

$$U(h)_1 = 1 * \sqrt{u^2{}_{set} + u^2{}_{Std} + u^2{}_{Std} + u^2{}_{instab} + u^2{}_{inhom} + u^2{}_{res}}$$

$$U(h)_2 = 2 * \sqrt{u^2{}_{set} + u^2{}_{Std} + u^2{}_{Std} + u^2{}_{instab} + u^2{}_{inhom} + u^2{}_{res}}$$

9. ISPITIVANJE KARAKTERISTIKA HIGROSTATIRANE KOMORE

9.1 POSTUPAK ISPITIVANJA KARAKTERISTIKA KOMORE

Postupak ispitivanja karakteristika higrostatirane komore provodio se u Laboratoriju za procesna mjerenja, Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Nakon gore opisanog umjeravanja otporničkih platinskih termometara te određivanja individualne karakteristike svakom od njih (osim etalonskog i termometra korištenog za mjerenje utjecaja zračenja), mjerna linija je premještena u prostoriju s komorom. Mjerna linija se sastojala od: 10 otporničkih termometara, mjerne postaje (multipleksor, višekanalana upravljačka jedinica i otpornički most), higrometra te osobnog računala.



Slika 8 Oprema korištena za ispitivanje karakteristika higrostatirane komore

Deset otporničik termometara postavljeno je unutar komore, na način da je osam ih postavljeno u kutove komore, dok su preostala dva postavljena u središte komore. Termometri su postavljeni tako da su od svake stijenke udaljeni pet centimetara. Jedan od postavljenih (TEPOT – 19) korišten je kao etalonski tj. referentni termometara, a drugi (TEPOT – 21) je obložen aluminijskom folijom kako bi se mogao mjeriti utjecaj zračenja stijenki komore. U blizini referentnog termometra postavljen je higrometar koji smo koristili za mjerenje rosišta.



Slika 9 Mjerne lokacije termometara i higrometra

Raspored postavljenih termometara je sljedeći:

Pozicija	Kanal	Opis pozicije
PT1	*CH0*	*Donja, prednja, lijeva strana*
PT2	*CH3*	*Donja, prednja, desna strana*
PT3	*CH5*	*Donja, stražnja desna strana*
PT4	*CH4*	*Donja, stražnja lijeva strana*
PT5	*CH6*	*Gornja, prednja, lijeva strana*
PT6	*CH7*	*Gornja, prednja, desna strana*
PT7	*CH1*	*Gornja, stražnja, desna strana*
PT8	*CH8*	*Gornja, stražnja, lijeva strana*
PT9	*CH2*	*Središnja točka*
PT10	*CH9*	*Središnja točka*

Tablica 12 Oznake mjernih lokacija povezana s kanalima mjerne postaje

Na računalu su bilježeni podaci, bilježenje podataka se vršilo svakih 200 sekundi, tj. 3 minute i 20 sekundi, ukupno vrijeme trajanja bilježenja podataka je 45 minuta, nakon postizanja stabilnog stanja unutar komore. Komora je ispitivana na četiri temperaturne točke, a to su: 10 °C, 30 °C, 50 °C i 70 °C.

9.2 OBRADA IZMJERENIH REZULTATA

Ispitivani objekt	Higrostatirana komora
Datum ispitivanja	4. – 5. studenog 2019.
Referentna pozicija	PT9
Ostale pozicije	$PT_i = 1,\ldots,10$
Ispitivanje je provedeno na praznoj higrostatiranoj komori.	

Tablica 13 Podaci o provedenom ispitivanju

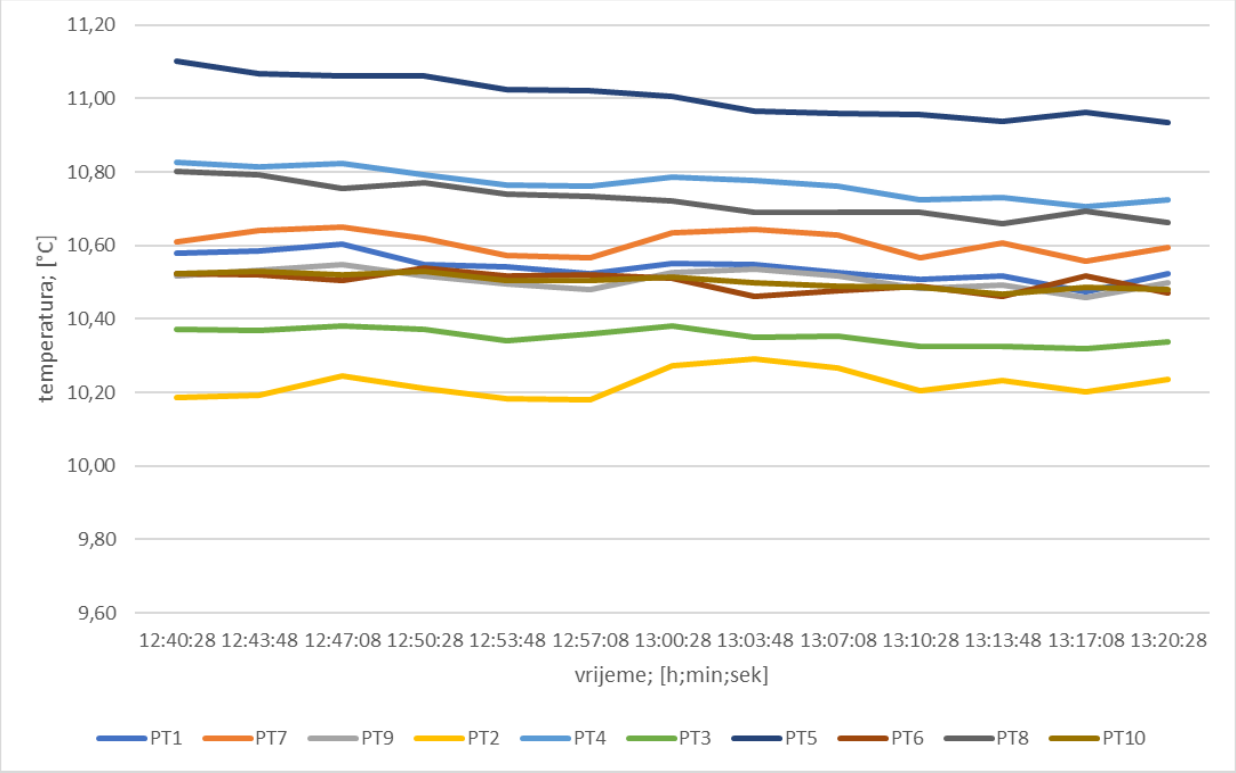
Napomena:

Prilikom obrade rezultata uočena su odstupanja termometra na poziciji broj 3 (PT3), značajnija naspram ostalih korištenih termometara, stoga je opravdana sumnja u ispravnost korištenog termometra na toj mjernoj poziciji te smo zabilježene rezultate izuzeli iz proračuna.

9.2.1 TEMPERATURA NA REGULATORU KOMORE POSTAVLJENA NA 10 °C

Postavljena temperatura, °C	10				
Relativna vlažnost, %rh	50				
Vrijeme početka ispitivanja	12:40:28				
Vrijeme kraja ispitivanja	13:23:48				
Očitanja temperature					
Oznaka pozicije	*PT1*	*PT2*	*PT3*	*PT4*	*PT5*
Temperatura pozicije, °C	10,54	10,23	10,35	10,77	11,01
u_{stdev}, °C	0,034	0,038	0,021	0,039	0,056
Oznaka pozicije	*PT6*	*PT7*	*PT8*	*PT9*	*PT10*
Temperatura pozicije, °C	10,53	10,61	10,76	10,51	10,53
u_{stdev}, °C	0,093	0,032	0,135	0,025	0,101
t_{max}, °C	11,01				
t_{min}, °C	10,23				
t_{max} - t_{ref}, °C	0,501				
t_{ref} - t_{min}, °C	0,280				
Utjecaj zračenja, °C	0,022				
Temperaturna nehomogenost, °C	0,501				

Tablica 14 Rezultati ispitivanja komore pri postavljenoj temperaturi regulatora na 10 °C



Graf 2 Prikaz temperature u svim mjernim točkama pri temperaturi 10 °C

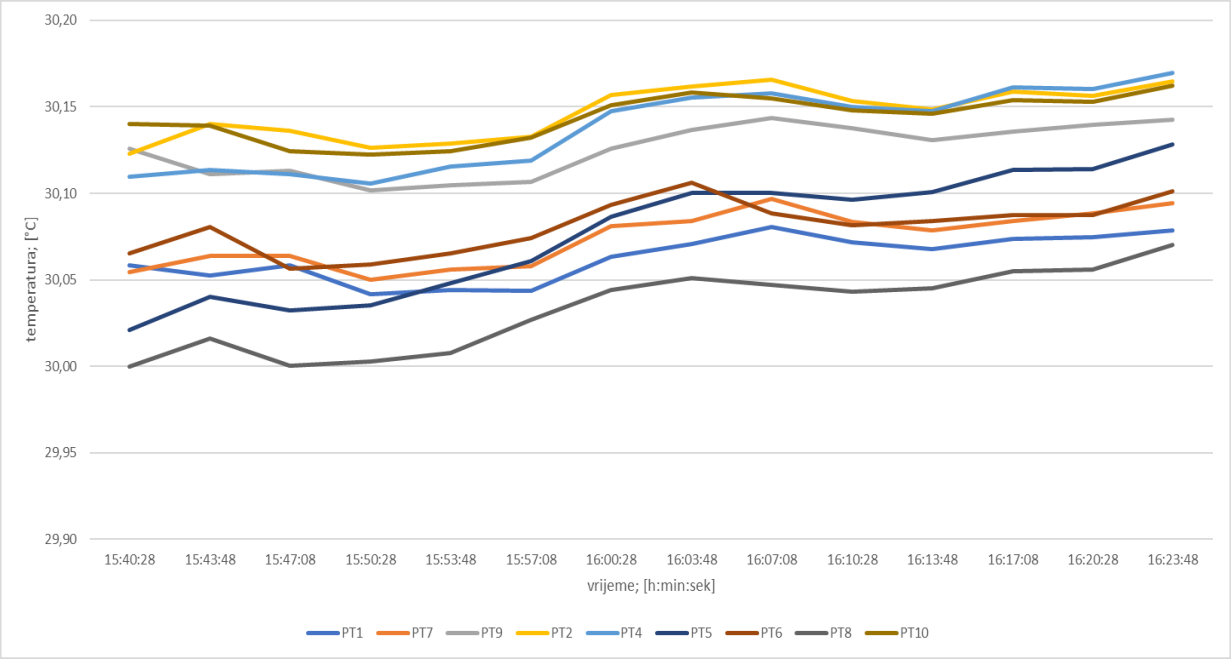
Oznaka	Opis	Temperature i pripadne korekcije, °C	Doprinos nesigurnosti, mK	Razdioba	Standardna nesigurnosti, mK
t_{std}	temperatura u referentnoj točki	10,51	25	Normalna (1σ)	25
δt_{cal}	kalibracija termometra	0	150	Normalna (2σ)	75
δt_{drift}	klizanje termometra	0	15	Pravokutna	9
t_{set}	vrijednost temp. postavljene na regulatoru komore	10			
δt_{inhom}	prostorna nehomogenost temperature		501	Pravokutna	289
δt_{instab}	vremenska nestabilnost temperature		135	Normalna	135
δt_{rad}	utjecaj zračenja		22	Pravokutna	12
δt_{res}	rezolucija namještanja temperature na komori	0	100	Pravokutna	29
$U_{k=1}$	331	mK			
$U_{k=2}$	661	mK			

Tablica 15 Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti pri postavljenoj temperaturi regulatora na 10 °C

9.2.2 TEMPERATURA NA REGULATORU KOMORE POSTAVLJENA NA 30 °C

Postavljena temperatura, °C	30				
Relativna vlažnost, %rh	50				
Vrijeme početka ispitivanja	15:40:28				
Vrijeme kraja ispitivanja	16:23:48				
Očitanja temperature					
Oznaka pozicije	*PT1*	*PT2*	*PT3*	*PT4*	*PT5*
Temperatura pozicije, °C	30,06	30,15	29,56	30,14	30,08
u_{stdev}, °C	0,013	0,015	0,018	0,023	0,036
Oznaka pozicije	*PT6*	*PT7*	*PT8*	*PT9*	*PT10*
Temperatura pozicije, °C	30,08	30,07	30,03	30,13	30,14
u_{stdev}, °C	0,015	0,016	0,024	0,015	0,013
t_{max}, °C	30,15				
t_{min}, °C	30,03				
t_{max} - t_{ref}, °C	0,021				
t_{ref} - t_{min}, °C	0,092				
Utjecaj zračenja, °C	0,018				
Temperaturna nehomogenost, °C	0,092				

Tablica 16 Rezultati ispitivanja komore pri postavljenoj temperaturi regulatora na 30 °C



Graf 3 Prikaz temperature u svim mjernim točkama pri temperaturi 30 °C

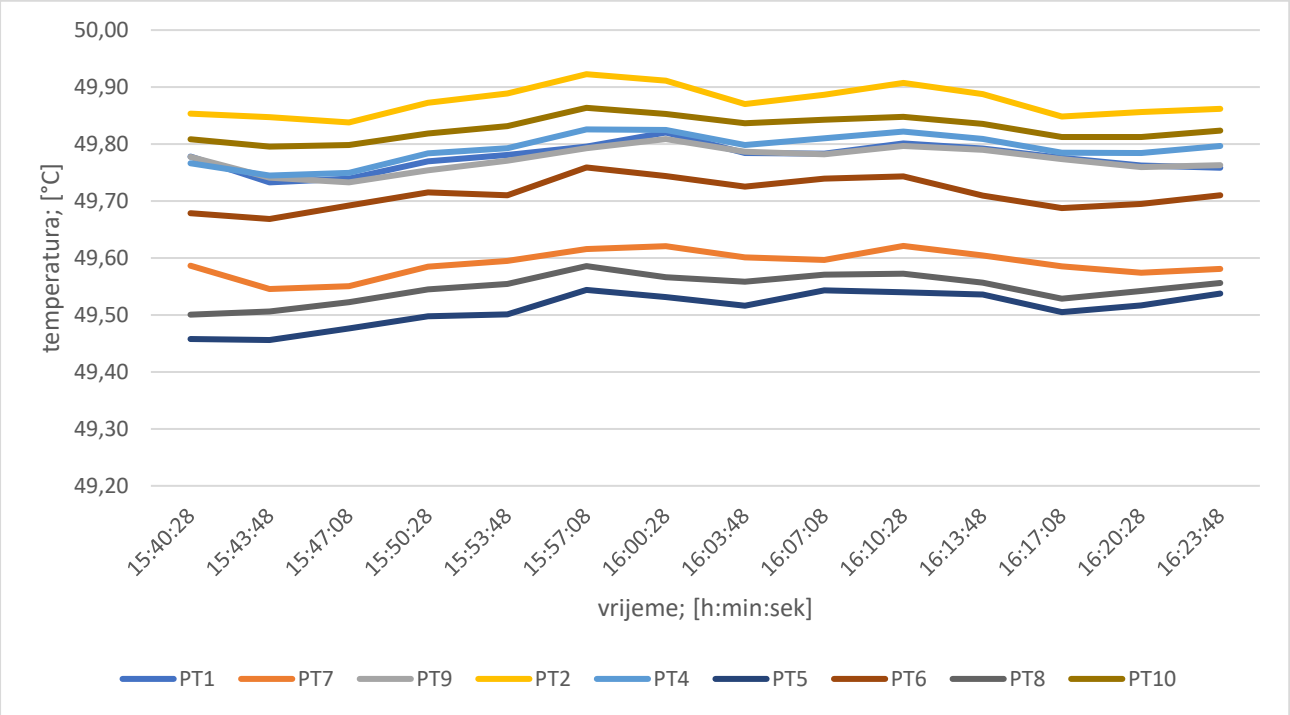
Oznaka	Opis	Temperature i pripadne korekcije, °C	Doprinos nesigurnosti, mK	Razdioba	Standardna nesigurnosti, mK
t_{std}	temperatura u referentnoj točki	30,13	15	Normalna (1σ)	15
δt_{cal}	kalibracija termometra	0	150	Normalna (2σ)	75
δt_{drift}	klizanje termometra	0	15	Pravokutna	9
t_{set}	vrijednost temp. postavljene na regulatoru komore	10			
δt_{inhom}	prostorna nehomogenost temperature		92	Pravokutna	53
δt_{instab}	vremenska nestabilnost temperature		36	Normalna	36
δt_{rad}	utjecaj zračenja		92	Pravokutna	53
δt_{res}	rezolucija namještanja temperature na komori	0	100	Pravokutna	29
$U_{k=1}$	117	mK			
$U_{k=2}$	234	mK			

Tablica 17 Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti pri postavljenoj temperaturi regulatora na 30 °C

9.2.3 TEMPERATURA NA REGULATORU KOMORE POSTAVLJENA NA 50 °C

Postavljena temperatura, °C	50				
Relativna vlažnost, %rh	50				
Vrijeme početka ispitivanja	12:34:39				
Vrijeme kraja ispitivanja	13:17:59				
Očitanja temperature					
Oznaka pozicije	*PT1*	*PT2*	*PT3*	*PT4*	*PT5*
Temperatura pozicije, °C	49,78	49,88	48,78	49,79	49,51
u_{stdev}, °C	0,023	0,026	0,025	0,026	0,031
Oznaka pozicije	*PT6*	*PT7*	*PT8*	*PT9*	*PT10*
Temperatura pozicije, °C	49,71	49,59	49,55	49,77	49,83
u_{stdev}, °C	0,027	0,023	0,025	0,022	0,021
t_{max}, °C	49,88				
t_{min}, °C	49,51				
t_{max} - t_{ref}, °C	0,102				
t_{ref} - t_{min}, °C	0,262				
Utjecaj zračenja, °C	0,054				
Temperaturna nehomogenost, °C	0,262				

Tablica 18 Rezultati ispitivanja komore pri postavljenoj temperaturi regulatora na 50 °C



Graf 4 Prikaz temperature u svim mjernim točkama pri temperaturi 50 °C

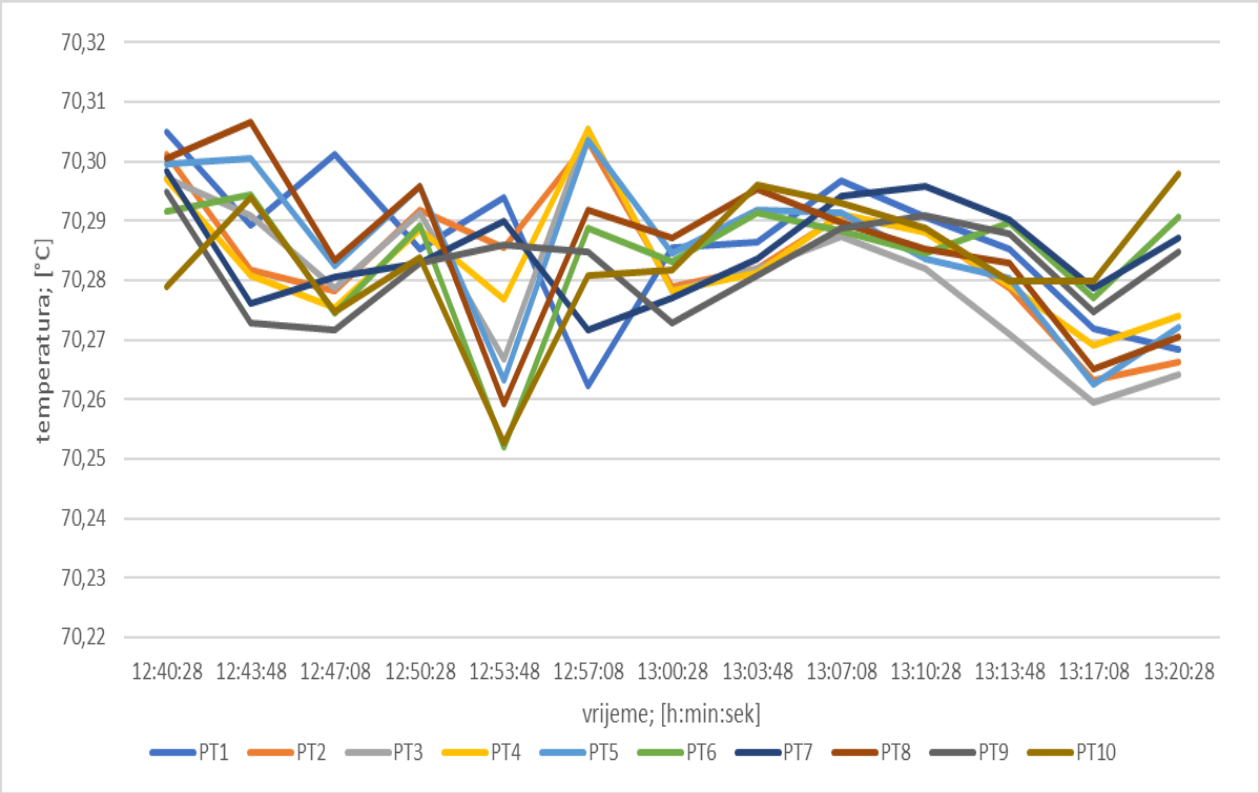
Oznaka	Opis	Temperature i pripadne korekcije, °C	Doprinos nesigurnosti, mK	Razdioba	Standardna nesigurnosti, mK
t_{std}	temperatura u referentnoj točki	49,77	22	Normalna (1σ)	22
δt_{cal}	kalibracija termometra	0	150	Normalna (2σ)	75
δt_{drift}	klizanje termometra	0	15	Pravokutna	9
t_{set}	vrijednost temp. postavljene na regulatoru komore	10			
δt_{inhom}	prostorna nehomogenost temperature		262	Pravokutna	151
δt_{instab}	vremenska nestabilnost temperature		31	Normalna	31
δt_{rad}	utjecaj zračenja		54	Pravokutna	31
δt_{res}	rezolucija namještanja temperature na komori	0	100	Pravokutna	29
$U_{k=1}$	178	mK			
$U_{k=2}$	357	mK			

Tablica 19 Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti pri postavljenoj temperaturi regulatora na 50 °C

9.2.4 TEMPERATURA NA REGULATORU KOMORE POSTAVLJENA NA 70 °C

Postavljena temperatura, °C	70				
Relativna vlažnost, %rh	50				
Vrijeme početka ispitivanja	11:57:17				
Vrijeme kraja ispitivanja	12:40:37				
Očitanja temperature					
Oznaka pozicije	*PT1*	*PT2*	*PT3*	*PT4*	*PT5*
Temperatura pozicije, °C	70,29	70,28	70,28	70,28	70,28
u_{stdev}, °C	0,013	0,012	0,014	0,010	0,014
Oznaka pozicije	*PT6*	*PT7*	*PT8*	*PT9*	*PT10*
Temperatura pozicije, °C	70,28	70,29	70,28	70,28	70,28
u_{stdev}, °C	0,011	0,009	0,017	0,008	0,011
t_{max}, °C	70,29				
t_{min}, °C	70,28				
t_{max} - t_{ref}, °C	0,002				
t_{ref} - t_{min}, °C	0,004				
Utjecaj zračenja, °C	0,000				
Temperaturna nehomogenost, °C	0,004				

Tablica 20 Rezultati ispitivanja komore pri postavljenoj temperaturi regulatora na 70 °C



Graf 5 Prikaz temperature u svim mjernim točkama pri temperaturi 70 °C

Oznaka	Opis	Temperature i pripadne korekcije, °C	Doprinos nesigurnosti, mK	Razdioba	Standardna nesigurnosti, mK
t_{std}	temperatura u referentnoj točki	70,28	8	Normalna (1σ)	8
δt_{cal}	kalibracija termometra	0	150	Normalna (2σ)	75
δt_{drift}	klizanje termometra	0	15	Pravokutna	9
t_{set}	vrijednost temp. postavljene na regulatoru komore	10			
δt_{inhom}	prostorna nehomogenost temperature		4	Pravokutna	2
δt_{instab}	vremenska nestabilnost temperature		17	Normalna	17
δt_{rad}	utjecaj zračenja		0	Pravokutna	0
δt_{res}	rezolucija namještanja temperature na komori	0	100	Pravokutna	29
$U_{k=1}$	83	mK			
$U_{k=2}$	166	mK			

Tablica 21 Izračun standardne i proširene mjerne nesigurnosti pri postavljenoj temperaturi regulatora na 70 °C

9.2.5 MJERNA NESIGURNOST UMJERAVANJA MJERILA RELATIVNE VLAŽNOSTI

Kako bi odredili utjecaj karakteristika komore na ukupnu mjernu nesigurnost uveli smo sljedeću pretpostavku:

Broj molekula vodene pare u jedinici volumena zraka (odnosno Temperatura rosišta, T_{dp}) jednaka je u svim mjernim točkama.

Uvođenjem ove pretpostavke slijedi da će relativna vlažnost biti funkcija samo temperature T_i na pojedinoj mjernoj poziciji.

$$\phi = f(T_i), \qquad p_{komore}, T_{dp} = konst.$$

Higrometar postavljen u referentnoj točki komore mjeri relativnu vlažnost, temperaturu rosišta i temperaturu referentne točke. Na temelju tih podataka možemo izračunati koeficijent osjetljivosti za tu ispitnu točku, množenjem koeficijenta osjetljivosti s mjernom nesigurnošću izračunatom u gornjem poglavlju dobit ćemo utjecaj karakteristika komore na ukupnu mjernu nesigurnost umjeravanja mjerila relativne vlažnosti zraka.

9.2.5.1 PRI POSTAVLJENOJ TEMPERATURI REGULATORA 10 °C I RELATIVNOJ VLAŽNOSTI 50 %

Postavljena temperatura, °C	10				
Postavljena relativna vlažnost, %rh	50				
Tlak u komori, kPa	1013,5				
Vrijeme početka ispitivanja	12:40:28				
Vrijeme kraja ispitivanja	13:23:48				
Temperatura rosišta, °C	0,064				
Izračunata relativna vlažnost					
Oznaka pozicije	PT1	PT2	PT3	PT4	PT5
Relativna vlažnost pozicije, %rh	48,2	49,2	48,8	47,5	46,7
Oznaka pozicije	PT6	PT7	PT8	PT9	
Relativna vlažnost pozicije, %rh	48,3	48,0	47,5	48,3	
φ_{max}, %rh	49,2				
φ_{min}, %rh	46,7				
$\varphi_{max} - \varphi_{ref}$, %rh	0,9				
$\varphi_{ref} - \varphi_{min}$, %rh	1,6				
Nehomogenost relativne vlažnosti, %rh	1,6				

Tablica 22 Rezultati ispitivanja komore korištenjem higrometra pri postavljenoj temperaturi regulatora 10 °C i relativnoj vlažnosti 50 %

Oznaka	Opis	Temperature i pripadne korekcije, °C	Doprinos nesigurnosti, mK	Razdioba	Standardna nesigurnosti, mK	Koeficijent osjetljivosti, %rh/°C	Standardna nesigurnosti, %rh
t_{std}	temperatura u referentnoj točki	10,51	25	Normalna (1σ)	25	-3,35	0,08
δt_{cal}	kalibracija termometra	0	150	Normalna (2σ)	75	-3,35	0,25
δt_{drift}	klizanje termometra	0	15	Pravokutna	9	-3,35	0,03
t_{set}	vrijednost temp. postavljene na regulatoru komore	10					
δt_{inhom}	prostorna nehomogenost temperature		501	Pravokutna	289	-3,35	0,97
δt_{instab}	vremenska nestabilnost temperature		135	Normalna	135	-3,35	0,45
δt_{rad}	utjecaj zračenja		22	Pravokutna	12	-3,35	0,04
δt_{res}	rezolucija namještanja temperature na komori	0	100	Pravokutna	29	-3,35	0,10
$U_{k=1}$	331	mK				$U_{k=1}$, %rh	1,1
$U_{k=2}$	661	mK				$U_{k=2}$, %rh	2,2

Tablica 23 Utjecaj karakteristika komore na ukupnu mjernu nesigurnost pri postavljenoj temperaturi regulatora 10 °C i relativnoj vlažnosti 50 %

9.2.5.2 PRI POSTAVLJENOJ TEMPERATURI REGULATORA 30 °C I RELATIVNOJ VLAŽNOSTI 50 %

Postavljena temperatura, °C	30				
Postavljena relativna vlažnost, %rh	50				
Tlak u komori, kPa	1013,5				
Vrijeme početka ispitivanja	15:40:28				
Vrijeme kraja ispitivanja	16:23:48				
Temperatura rosišta, °C	17,65				
Izračunata relativna vlažnost					
Oznaka pozicije	PT1	PT2	PT3	PT4	PT5
Relativna vlažnost pozicije, %rh	47,4	47,1	48,8	47,2	47,3
Oznaka pozicije	PT6	PT7	PT8	PT9	
Relativna vlažnost pozicije, %rh	47,3	47,3	47,4	47,2	
φ_{max}, %rh	47,4				
φ_{min}, %rh	47,1				
$\varphi_{max} - \varphi_{ref}$, %rh	0,2				
$\varphi_{ref} - \varphi_{min}$, %rh	0,1				
Nehomogenost relativne vlažnosti, %rh	0,2				

Tablica 24 Rezultati ispitivanja komore korištenjem higrometra pri postavljenoj temperaturi regulatora 30 °C i relativnoj vlažnosti 50 %

Oznaka	Opis	Temperature i pripadne korekcije, °C	Doprinos nesigurnosti, mK	Razdioba	Standardna nesigurnosti, mK	Koeficijent osjetljivosti, %rh/°C	Standardna nesigurnosti, %rh
t_{std}	temperatura u referentnoj točki	30,13	15	Normalna (1σ)	15	-2,73	0,04
δt_{cal}	kalibracija termometra	0	150	Normalna (2σ)	75	-2,73	0,20
δt_{drift}	klizanje termometra	0	15	Pravokutna	9	-2,73	0,02
t_{set}	vrijednost temp. postavljene na regulatoru komore	10					
δt_{inhom}	prostorna nehomogenost temperature		92	Pravokutna	53	-2,73	0,15
δt_{instab}	vremenska nestabilnost temperature		36	Normalna	36	-2,73	0,10
δt_{rad}	utjecaj zračenja		92	Pravokutna	53	-2,73	0,15
δt_{res}	rezolucija namještanja temperature na komori	0	100	Pravokutna	29	-2,73	0,08
$U_{k=1}$	117	mK				$U_{k=1}$, %rh	0,3
$U_{k=2}$	234	mK				$U_{k=2}$, %rh	0,64

Tablica 25 Utjecaj karakteristika komore na ukupnu mjernu nesigurnost pri postavljenoj temperaturi regulatora 30 °C i relativnoj vlažnosti 50 %

9.2.5.3 PRI POSTAVLJENOJ TEMPERATURI REGULATORA 50 °C I RELATIVNOJ VLAŽNOSTI 50 %

Postavljena temperatura, °C	50				
Postavljena relativna vlažnost, %rh	50				
Tlak u komori, kPa	1013,5				
Vrijeme početka ispitivanja	12:34:39				
Vrijeme kraja ispitivanja	13:17:59				
Temperatura rosišta, °C	32				
Izračunata relativna vlažnost					
Oznaka pozicije	PT1	PT2	PT3	PT4	PT5
Relativna vlažnost pozicije, %rh	38,9	38,7	40,9	38,9	39,5
Oznaka pozicije	PT6	PT7	PT8	PT9	
Relativna vlažnost pozicije, %rh	39,1	39,3	39,4	38,9	
φ_{max}, %rh	39,5				
φ_{min}, %rh	38,7				
$\varphi_{max} - \varphi_{ref}$, %rh	0,6				
$\varphi_{ref} - \varphi_{min}$, %rh	0,2				
Nehomogenost relativne vlažnosti, %rh	0,6				

Tablica 26 Rezultati ispitivanja komore korištenjem higrometra pri postavljenoj temperaturi regulatora 50 °C i relativnoj vlažnosti 50 %

Oznaka	Opis	Temperature i pripadne korekcije, °C	Doprinos nesigurnosti, mK	Razdioba	Standardna nesigurnosti, mK	Koeficijent osjetljivosti, %rh/°C	Standardna nesigurnosti, %rh
t_{std}	temperatura u referentnoj točki	49,77	22	Normalna (1σ)	22	-1,92	0,0
δt_{cal}	kalibracija termometra	0	150	Normalna (2σ)	75	-1,92	0,1
δt_{drift}	klizanje termometra	0	15	Pravokutna	9	-1,92	0,0
t_{set}	vrijednost temp. postavljene na regulatoru komore	10					
δt_{inhom}	prostorna nehomogenost temperature		262	Pravokutna	151	-1,92	0,3
δt_{instab}	vremenska nestabilnost temperature		31	Normalna	31	-1,92	0,1
δt_{rad}	utjecaj zračenja		54	Pravokutna	31	-1,92	0,1
δt_{res}	rezolucija namještanja temperature na komori	0	100	Pravokutna	29	-1,92	0,1
$U_{k=1}$	178	mK				$U_{k=1}$, %rh	0,3
$U_{k=2}$	357	mK				$U_{k=2}$, %rh	0,7

Tablica 27 Utjecaj karakteristika komore na ukupnu mjernu nesigurnost pri postavljenoj temperaturi regulatora 50 °C i relativnoj vlažnosti 50 %

9.2.5.4 PRI POSTAVLJENOJ TEMPERATURI REGULATORA 70 °C I RELATIVNOJ VLAŽNOSTI 50 %

Postavljena temperatura, °C	70				
Postavljena relativna vlažnost, %rh	50				
Tlak u komori, kPa	1013,5				
Vrijeme početka ispitivanja	11:57:59				
Vrijeme kraja ispitivanja	12:40:37				
Temperatura rosišta, °C	50				
Izračunata relativna vlažnost					
Oznaka pozicije	PT1	PT2	PT3	PT4	PT5
Relativna vlažnost pozicije, %rh	38,2	38,2	38,3	38,2	38,2
Oznaka pozicije	PT6	PT7	PT8	PT9	
Relativna vlažnost pozicije, %rh	38,2	38,2	38,2	38,2	
φ_{max}, %rh	38,3				
φ_{min}, %rh	38,2				
$\varphi_{max} - \varphi_{ref}$, %rh	0,1				
$\varphi_{ref} - \varphi_{min}$, %rh	0				
Nehomogenost relativne vlažnosti, %rh	0,1				

Tablica 28 Rezultati ispitivanja komore korištenjem higrometra pri postavljenoj temperaturi regulatora 70 °C i relativnoj vlažnosti 50 %

Oznaka	Opis	Temperature i pripadne korekcije, °C	Doprinos nesigurnosti, mK	Razdioba	Standardna nesigurnosti, mK	Koeficijent osjetljivosti, %rh/°C	Stand. nesigurnosti, %rh
tstd	temperatura u referentnoj točki	70,28	8	Normalna (1σ)	8	-1,67	0,0
δtcal	kalibracija termometra	0	150	Normalna (2σ)	75	-1,67	0,1
δtdrift	klizanje termometra	0	15	Pravokutna	9	-1,67	0,0
tset	vrijednost temp. postavljene na regulatoru komore	10					
δtinhom	prostorna nehomogenost temperature		4	Pravokutna	2	-1,67	0,0
δtinstab	vremenska nestabilnost temperature		17	Normalna	17	-1,67	0,0
δtrad	utjecaj zračenja		0	Pravokutna	0	-1,67	0,0
δtres	rezolucija namještanja temperature na komori	0	100	Pravokutna	29	-1,67	0,0
$U_{k=1}$	83	mK				**$U_{k=1}$, %rh**	0,1
$U_{k=2}$	166	mK				**$U_{k=2}$, %rh**	0,3

Tablica 29 Utjecaj karakteristika komore na ukupnu mjernu nesigurnost pri postavljenoj temperaturi regulatora 70 °C i relativnoj vlažnosti 50 %

10. ZAKLJUČAK

Ovaj završni rad izrađen je u skladu s uputama Calibration of climatic and thermostated chambers CP – VL03 koju je izradio Laboratorij za procesna mjerenja, Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Prema smjernicama upute sastavljena je mjerna linija za ispitivanje higrostatirane komore. Prethodno smo trebali umjeriti korištene platinske otporničke termometre kako bi im odredili individualnu karakteristiku i doveli ih u vezu s definicijom temperaturne ljestvice. Ispitivanjem higrostatirane komore željeli smo odrediti njene karakteristike, točnije gradijente i stalnost temperature, kao i relativne vlažnosti zraka unutar radnog volumena komore. Također je određen doprinos ukupnoj mjernoj nesigurnosti umjeravanja, kada se ona koristi za umjeravanje mjerila relativne vlažnosti. Rezultati ispitivanja služe kao kriterij prilikom odlučivanja o upotrebljivosti komore u svrhu umjeravanja mjerila relativne vlažnosti zraka.

Ispitivanje komore provedeno je s devet industrijskih platinskih otporničkih termometara, te jednim etalonskim termometrom postavljenim u referentnu (središnju) poziciju komore. Uz termometre, za određivanje gradijenata relativne vlažnosti zraka, korišten je jedan etalonski higrometar točke rose s hlađenim ogledalom, postavljen također u referentu točku. Za otpornički termometar koji se za vrijeme ispitivanja nalazio na poziciji 3 (PT3) opravdana je sumnja u neispravnost, zbog velike razlike u očitanjima u odnosu na preostale termometre.

Iz dobivenih rezultata ispitivanja higrostatirane komore možemo utvrditi da najveći doprinos mjernoj nesigurnosti ima prostorna nehomogenost temperature. Doprinos prostornih gradijenata se povećava s povećanjem temperature u komori, a taj efekt se može tumačiti da zbog povećanja temperature postaje intenzivnija izmjena topline s okolinom. Prilikom mjerenja relativne vlažnosti ustanovljen je velik nesrazmjer između relativne vlažnosti koju postavimo na regulatoru komore, te one koju smo mjerili pomoću higrometra. U pravilu je relativna vlažnost u komori bila niža od one postavljene na regulatoru komore (50%rh).

LITERATURA

[1.] HERAEUS INDUSTRITECHNIK, Operating instructions Climatic Test Chamber HC 0020, HC 0033, HC0057, 1996

[2.] General Eastern instruments, Humidity handbook, Woburn, 1993.

[3.] Zvizdić D., Calibration of climatic and thermostated chambers CP – VL03, Laboratorij za procesna mjerenja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.

[4.] Deutscher Kalibrierdienst, DKD – R 5 – 7 Kalibrierung von Klimaschranken, Braunschweig, 2004.

[5.] International Organization for Standardization . *A Guide to Expression of Uncertainty in Measurement.* Geneva, 1995.

[6.] Antun Galović, Termodinamika II, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.