

Umjeravanje etalonskog higrometra točke rose s hlađenim ogledalom

Ljubičić, Filip

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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:235:681265>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-06**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Filip Ljubičić

Zagreb, godina 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

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

Student:

Filip Ljubičić

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se mentoru doc.dr.sc Danijelu Šestanu na pomoći te stručnim savjetima tokom izrade.

Zahvaljujem se također i Ivanu Matasu na velikoj pomoći kod praktičnog dijela i na svim pruženim savjetima.

Filip Ljubičić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Filip Ljubičić** JMBAG: **0035218022**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Umjeravanje etalonskog higrometra točke rose s hlađenim ogledalom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Calibration of standard dew point hygrometer with a chilled mirror sensor**

Opis zadatka:

Potrebno je provesti postupak umjeravanja etalonskog higrometra točke rose s hlađenim ogledalom, koji se nalazi u Laboratoriju za procesna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje (FSB-LPM). Umjeravanje je potrebno provesti u najmanje tri umjerne točke, pri čemu će se koristiti primarni generator zraka poznatog rosišta u FSB-LPM-u.

U okviru izrade završnog rada potrebno je:


- Dati pregled teorijskih osnova vezanih uz generiranje zraka poznatog rosišta.
- Opisati postupak umjeravanja higrometra točke rose upotrebom primarnog generatora u FSB-LPM-u.
- Prikazati shemu spajanja i dati opis mjernog sustava korištenog za predmetno umjeravanje.
- Sastaviti mjernu liniju i provesti umjeravanje koristeći postojeće uređaje i pomoćnu opremu koja je na raspolaganju u FSB-LPM-u.
- Opisati postupak procjene i procijeniti nesigurnost predmetnog umjeravanja.
- Prikazati rezultate umjeravanja etalonskog higrometra točke rose.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Zadatak zadao:


Doc. dr. sc. Danijel Šestan


Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.
3. rok: 18. 9. 2023.

Predvideni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
2. VLAŽNOST	2
2.1. Vlažni zrak	2
2.2. Parcijalni tlak vodene pare	3
2.3. Rosište/injište	3
2.4. Mjerenje vlažnosti zraka	4
3. MJERNI SUSTAV	5
3.1. Priprema opreme	6
3.2. Određivanje karakterističnih točaka.....	6
3.3. Priprema generatora	6
3.4. Količina protoka zraka	6
3.5. Tlak u sustavu	6
3.6. Cijevi.....	7
3.7. Mjerenje temperature platinskim otporničkim osjetnicima	7
4. GENERIRANJE ZRAKA PRIMARNIM GENERATORIMA VLAŽNOSTI.....	8
4.1. Uvod.....	8
4.2. Formulacije	10
4.3. Niskotemperaturni saturator.....	12
4.4. Visokotemperaturni saturator.....	14
5. UMJERAVANJE.....	17
4.1. Mjerenja	18
4.2. Umjeravanje	17
6. MJERNE NESIGURNOSTI.....	19
6.1. Procjena mjerne nesigurnosti	19
6.1.1. Procjena mjerne nesigurnosti tip A.....	19
6.1.2. Procjena mjerne nesigurnosti tip B	20
6.2. Proširena mjerna nesigurnost	21
6.3. Mjerne nesigurnosti kod umjeravanja higrometra točke rose pomoću primarnog generatora vlažnog zraka	22
6.3.1. Mjerilo temperature zraka u saturatoru	22
6.3.2. Termometrijski otpornički most.....	23
6.3.3. Saturator	23
6.3.4. Tlak zraka u saturatoru.....	23
6.3.5. Tlak u blizini osjetnika injišta/rosišta	25

6.3.6. Umjeravani higrometar	25
7. ANALIZA REZULTATA	26
7.1. Umjeravanje higrometra točke rose s hlađenim ogledalom	25
7.1.1. Higrometar MBW 373H	25
7.2. Proširena mjerna nesigurnost umjeravanja	27
7.3. Budžet mjerne nesigurnosti.....	28
8. ZAKLJUČAK.....	33
9. LITERATURA	34

POPIS SLIKA

Slika 1.	Laboratorij za umjeravanje.....	5
Slika 2.	MBW 373H	5
Slika 3.	MBW 373LHX.....	5
Slika 4.	PTB330.....	7
Slika 5.	Osnovni principi umjeravanja	8
Slika 6.	Mjerna linija za ispitivanje saturatora	9
Slika 7.	Sustav za pripremu zraka za napajanje saturatora.....	10
Slika 8.	Niskotemperaturni saturator	12
Slika 9.	Predsaturator.....	13
Slika 10.	Saturacijska komora	14
Slika 11.	Visokotemperaturni saturator	14
Slika 12.	Pojednostavljena shema mjernog sustava za umjeravanje higrometara pomoću primarnih generatora vlažnosti	18
Slika 13.	Pravokutna razdioba	21
Slika 14.	Koeficijent osjetljivosti	24
Slika 15.	Grafički prikaz odstupanja umjeravanog higrometra MBW 373H u odnosu na referentno rosište/injište	26
Slika 16.	Grafički prikaz proširenih mjernih nesigurnosti za higrometar MBW 373H	27

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrijednosti odstupanja umjeravanog higrometra MBW 373H u odnosu na referentno rosište/injište..	26
Tablica 2. Proširena nesigurnost umjeravanja higrometra MBW 373H..	27
Tablica 3. Budžet nesigurnosti za rosište -20 °C.....	28
Tablica 4. Budžet nesigurnosti za rosište 1 °C.....	29
Tablica 5. Budžet nesigurnosti za rosište 20 °C.....	30
Tablica 6. Budžet nesigurnosti za rosište 40 °C.....	31
Tablica 7. Budžet nesigurnosti za rosište 60 °C.....	32

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
x	$\frac{kg_w}{kg_{sz}}$	vlažnost zraka
m_w	kg_w	masa vodene pare
m_{sz}	kg_{sz}	masa suhog zraka
φ	—	Relativna vlažnost
p_d	Pa	Parcijalni tlak vodene pare
p_s	Pa	Parcijalni tlak zasićenja
x_{ws}	$\frac{kg_w}{kg_{sz}}$	količinski udio vodene pare u saturatoru
t_s	°C	temperatura zraka u saturatoru
p_s	Pa	tlak zraka u saturatoru
$p_w(t_s)$	Pa	tlak zasićenja vodene pare
$f(p_s, t_s)$	—	faktor povećanja parcijalnog tlaka vodene pare pri temperaturi i tlaku zasićenja
x_{wd}	$\frac{kg_w}{kg_{sz}}$	maseni omjer vodene pare i suhog zraka na mjestu mjerenja
t_d	°C	temperatura zraka na mjestu mjerenja
p_d	Pa	tlak zraka na mjestu mjerenja
$p_w(t_d)$	Pa	tlak zasićenja vodene pare na mjestu mjerenja
$f(p_d, t_d)$	—	faktor povećanja parcijalnog tlaka vodene pare na mjestu mjerenja
$t_{s\ me a}$	°C	mjerena temperatura zraka u saturatoru
$\bar{t}_{s\ me a}$	°C	srednja vrijednost mjerene temperature zraka u saturatoru
C_p	$\frac{°C}{mbar}$	koeficijent osjetljivosti izmjerenog rosišta s obzirom na tlak zraka

SAŽETAK

U sklopu izrade Završnog rada provedeno je umjeravanje etalonskog higrometra točke rose s hlađenim ogledalom. Provedena su mjerenja, analizirani su dobiveni rezultati te je izvršena procjena mjernih nesigurnosti. U ovom slučaju umjeravan je instrument proizvođača MBW, model 373H. Za potrebe umjeravanja mjerila vlažnosti zraka Laboratorij za procesna mjerenja koristi nekoliko etalonskih higrometara točke rose s hlađenim ogledalom, a jedan od njih korišten je kao kontrolni instrument u ovom radu (MBW 373LHX). Umjeravanje je provedeno u rasponu od -20 °C do 60 °C, u 5 točaka s intervalom od 20 °C. U području injišta/rosišta od -20 °C do 1 °C korišten je niskotemperaturni saturator, dok je za umjeravanje u području od 1 °C do 60 °C korišten visokotemperaturni saturator. U radu su opisane korištene metode umjeravanja, formulacije za proračun temperature zraka i temperature rošenja, načini mjerenja vlažnosti zraka, te su određene mjerne nesigurnosti koje se pojavljuju u svakom umjeravanju.

Ključne riječi: injište/rosište, umjeravanje, niskotemperaturni saturator, visokotemperaturni saturator

SUMMARY

Within this bachelor thesis, the calibration of the standard dew/frost point hygrometer was carried out. The obtained results were analysed and measurement uncertainties were assessed. The instrument under calibration was produced by MBW company, model 373H. For the purposes of measuring air humidity, the Laboratory for Process Measurements uses several standard dew/frost point hygrometers with a cooled mirror. One of these hygrometers was used in this calibration as an controlling instrument (MBW 373LHX). Calibration was conducted in the dew point temperature range from -20 °C to 60 °C, in five points equally distributed with the interval of 20 °C between each point. In the range from -20 °C to 1 °C the low-range saturator was used, while the calibration in the range from 1 °C to 60 °C was performed using the high-range saturator. This thesis contains a description of used calibration methods, formulations for calculating air and dew point temperatures, methods of measuring air humidity, and a measurement uncertainties which appear in every type of calibration.

Key words: dew/frost point, calibration, low-range saturator, high-range saturator

1. UVOD

U sklopu izrade završnog rada, uz postavljanje mjerne linije, potrebno je provesti umjeravanje higrometra točke rose / injišta. Umjeravanje je provedeno u karakterističnim točkama unutar temperaturnog raspona od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, a kao radni medij korišten je zrak.

Laboratorij za procesna mjerenja (LPM) odgovoran je za državne etalone tlaka, temperature i vlažnosti. LPM se također bavi umjeravanjem higrometara točke rose s hlađenim ogledalom, te se na temelju dobivenih rezultata izdaje potvrda o umjeravanu. Potvrda sadrži podatke o umjeravanom instrumentu, postupku provedenog umjeravanja te pripadajuće mjerne nesigurnosti.

Umjeravanje instrumenata u LPM-u može se provesti u dva temperaturna područja: visokotemperaturnom ($1\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $60\text{ }^{\circ}\text{C}$) i niskotemperaturnom ($-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Za generiranje zraka poznatog injišta/rošišta u LPM-u se koriste dva primarna generatora: viskotemperaturni i niskotemperaturni.

2. VLAŽNOST

2.1. Vlažni zrak

Vlažni zrak predstavlja dvojni smjesu suhog zraka i vlage. Suhi zrak kao sudionik pojavljuje se samo u plinovitom obliku, a vlaga kao drugi sudionik javlja se u plinovitom, kapljevitom pa čak i u krutom agregatnom stanju. Sve dok je parcijalni tlak vodene pare u zraku manji od tlaka zasićenja vodene pare na temperaturi zraka, vodena para iz zraka neće kondenzirati. Ovisno o agregatnom stanju vlage u zraku, vlažni zrak može biti zasićen i nezasićen.

Vlažnost zraka se iskazuje kao omjer mase vodene pare i mase suhog zraka:

$$x = \frac{m_w}{m_{sz}}$$

x – vlažnost zraka [$\frac{kg_w}{kg_{sz}}$]

m_w – masa vodene pare [kg_w]

m_{sz} – masa suhog zraka [kg_{sz}]

Za slučaj suhog zraka $x = 0$

Za slučaj čiste vodene pare $x = \infty$

Vlažnost zraka se također često izražava i kao relativna vlažnost zraka φ pri temperaturi zraka t_z , a definira ju omjer parcijalnog tlaka vodene pare p_d i tlaka zasićenja p_s :

$$\varphi = \frac{p_d(t_z)}{p_s(t_z)}$$

Relativna vlažnost zraka se može također iskazati i drugom jednadžbom, u kojoj se parcijalni tlak vodene pare pri temperaturi t_z može zamijeniti tlakom zasićenja vodene pare na temperaturi točke rose t_d :

$$\varphi = \frac{p_s(t_d)}{p_s(t_z)}$$

2.2. Parcijalni tlak vodene pare

Ako se vlaga u binarnoj smjesi javlja u obliku vodene pare, tada je, prema Daltonovom zakonu, sveukupni tlak p smjese, jednak zbroju parcijalnog (sudioničkog) tlaka p_z suhog zraka i parcijalnog tlaka p_d vodene pare

$$p = p_d + p_z$$

2.3. Rosište/injište

Rosište je temperatura pri kojoj se prilikom hlađenja plina pojavi kondenzat. To je zapravo temperatura pri kojoj plin postaje zasićen, u ravnoteži s kapljevitom vodom. Pojam rosišta se često koristi i za temperature ispod 0 °C, no s obzirom da se pritom voda može nalaziti u krutom i kapljevitom stanju (pothlađena voda), uvodi se zaseban pojam injišta.

Injište je temperatura pri kojoj se prilikom hlađenja plina formira inje, odn. temperatura pri kojoj je zrak zasićen vodenom parom u ravnoteži s ledom.

Temperatura rošenja je temperatura do koje se vlaži zrak pri konstantnom tlaku mora hladiti, da bi započela kondenzacija vodene pare. Ta se temperatura može postići tako da se, uz nepromijenjenu količinu vodene pare, zrak ohlađuje do zasićenja. Tada stvarni tlak vodene pare postane jednak ravnotežnom tlaku. Pri temperaturi rosišta ili nižoj temperaturi, iznad 0 °C kondenzacijom se stvaraju kapljice vode, a ispod 0 °C stvara se led. Visoka relativna vlažnost zraka govori da smo vrlo blizu temperaturi rosišta.

Postoje instrumenti za mjerenje temperature rošenja. Ovi instrumenti većinom imaju polirano metalno ogledalo koje je moguće grijati ili hladiti, a zrak treba strujati preko njega. Kada se na ogledalu, prilikom hlađenja, pojave kapi vode ili sloj leda instrument nastavlja regulirati temperaturu ogledala tako da se na njemu održava sloj konstantne debljine. Temperatura ogledala mjeri se pomoću osjetnika ugrađenog u ogledalo. Kada se debljina sloja kondenzata odnosno leda na ogledalu ne mijenja, injište/rosište je približno jednako izmjerenoj temperaturi ogledala.

2.4. Mjerenje vlažnosti zraka

Mjerenje vlažnosti složeniji je proces od mjerenja protoka temperature i tlaka. Postoji mnoštvo različitih metoda za određivanje relativne vlažnosti zraka koje dijelimo na direktne i indirektne.

Direktne metode mjerenja vlažnosti zraka:

- Gravimetrijska metoda
- Psihrometri
 - Aspiracijski psihrometar po Assman–u
 - August–ov psihrometar
- Higrometri točke rose
 - S Peltier–ovim hladilom
 - S rashladnim fluidom
 - S litijevim kloridom (LiCl)

Indirektne metode mjerenja vlažnosti zraka:

- Higrometri s elastičnim elementima
- Otpornički higrometri:
 - električko–sorpcioni higrometar (s LiCl, prati se promjena električnog otpora)
- Dielektrični (kapacitivni) higrometri
 - dielektrični higrometar (s Al₂O₃, prati se promjena električnog kapaciteta dielektrika)

3. MJERNI SUSTAV

Praktični dio završnog rada odrađen je u Laboratoriju za procesna mjerenja (Slika 2). Umjeravanje sustava započinje pripremom opreme i provjerom ispravnosti svakog dijela sustava. Potrebno je prije samog paljenja sustava odrediti karakteristične vrijednosti u ovom slučaju temperature na kojima ćemo vršiti umjeravanja.



Slika 1. Laboratorij za umjeravanje

Umjeravani instrument je higrometar MBW 373H (Slika 1) a kao kontrolni higrometar korišten je MBW 373LHX (Slika 2)



Slika 2. MBW 373H



Slika 3. MBW 373LHX

3.1. Priprema opreme

Potrebno je prije svega izvršiti inspekciju elemenata sustava te posebno obratiti pozornost na čistoću osjetnika vlažnosti, ako je to moguće.

3.2. Određivanje karakterističnih točaka

Odredi se temperaturni raspon umjeravanja te interval, koji je u ovom slučaju 20 °C, krenuvši od -20 °C sve do 60 °C. U području niskih temperatura, umjeravanja su dugotrajna jer su generatoru potrebni sati da bi isušio sve cijevi kroz koje zrak struji do umjeravanog osjetnika te da bi se stabilizirao.

3.3. Priprema generatora

Generatori trebaju biti dobro spojeni s umjeravanim instrumentom, pri čemu svi spojevi cijevi moraju dobro brtviti. Potrebno je i nadgledati čistoću demineralizirane vode u intervalima od 6 do 12 mjeseci.

3.4. Protok zraka

Potrebno je osigurati odgovarajući protok zraka kroz sustav. Protok je potrebno održavati što je više moguće konstantnim jer utječe na toplinsko opterećenje saturatora a time i na stabilnost injišta/rošišta generiranog zraka. Ukupan protok zraka kroz saturator ne smije biti manji od 1 L/min niti veći od 2.5 L/min. Sa saturatorom su paralelno spojeni umjeravani i kontrolni higrometar. Protok zraka kroz svaki od higrometara je, pomoću pripadnih preciznih rotametara, bio podešen na 500 mL/min.

Potrebno je osigurati i blagi protok zraka kroz cijev kroz koju se postavlja osjetnik za mjerenje temperature zraka u saturatoru, čime se smanjuje toplinski tok kroz tijelo osjetnika. Na ovaj način se iz prostora između cijevi i osjetnika temperature također uklanja i zaostala vlaga koja bi kasnije mogla utjecati na stabilnost generatora.

3.5. Tlak u sustavu

Pad tlaka između higrometra i saturatora je funkcija protoka i temperature rošenja. Mjeri se između komore saturatora i na izlazu iz higrometra tj. u blizini ogledala. PTB330 (Slika 3) je uređaj korišten za mjerenje tlaka zraka u glavnoj saturacijskoj komori te u neposrednoj blizini umjeravanog osjetnika.



Slika 4. PTB330

3.6. Cijevi

Cijevi kroz koje zrak struji od saturatora do umjeravanog i kontrolnog higrometra su grijane da u njima ne bi došlo do kondenzacije vodene pare u slučajevima kada je rosište generiranog zraka više od sobne temperature. Također se griju i mjesta spojeva grijanih cijevi s generatorom i ulaznim priključcima higrometara. Cijevi se uobičajeno griju na temperaturu koja je barem 20 °C viša od rosišta zraka koji kroz njih struji. Temperatura grijanih cijevi ne smije pretjerano oscilirati jer bi to moglo imati utjecaj na stabilnost očitavanja rosišta na higrometrima.

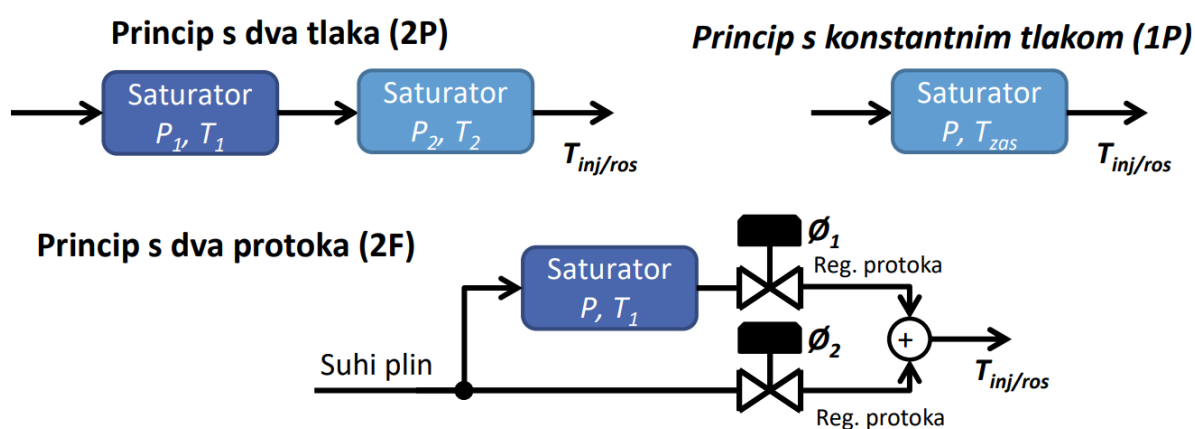
3.7. Mjerenje temperature platinskim otporničkim osjetnicima

Princip rada mjerila temperature s otporničkim osjetnicima se zasniva na činjenici da se električni otpor metalnih vodiča mijenja s promjenom temperature. Izmjereni otpor osjetnika se preračunava u temperaturu na temelju karakteristične jednadžbe, čiji se koeficijenti određuju umjeravanjem termometra.

4. GENERIRANJE ZRAKA PRIMARNIM GENERATORIMA VLAŽNOSTI

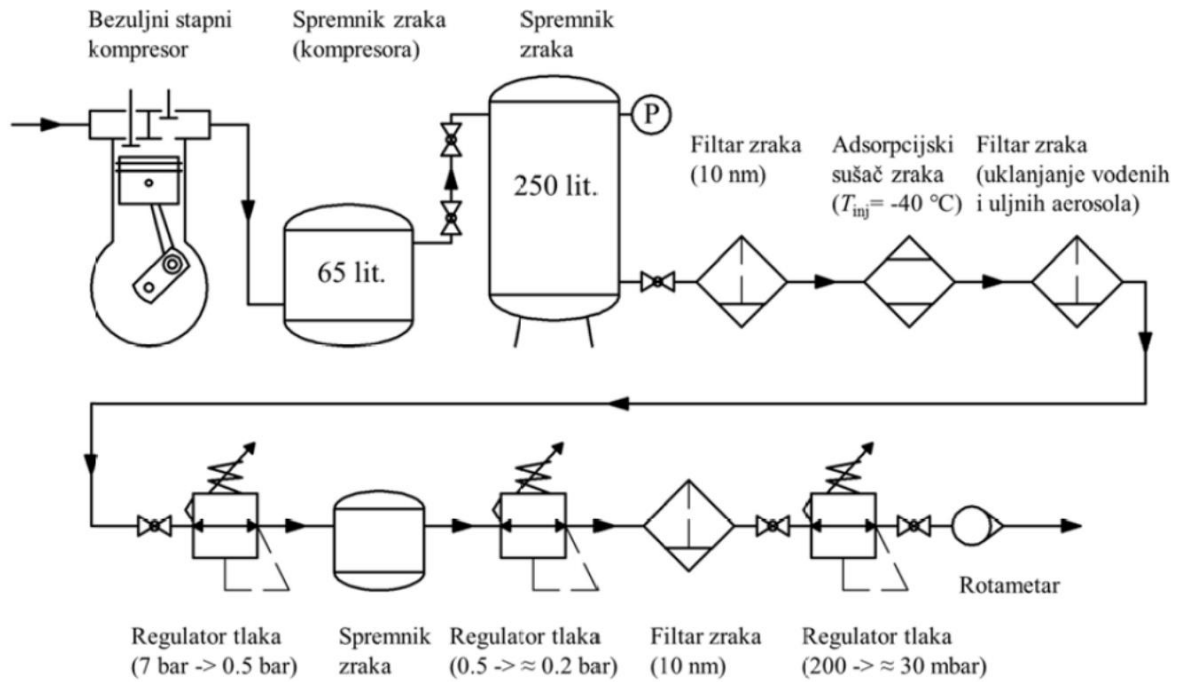
4.1. Uvod

Zrak poznatog rosišta proizvodi se pomoću generatora točke rose. Generiranje plina poznatog injišta/rosišta postiže se zasićivanjem plina vodenom parom, pri konstantnoj temperaturi i konstantnom tlaku. Proizvoljno injište/rosište postiže se regulacijom temperature i tlaka plina. Tri osnovna principa generiranja plina konstantne vlažnosti (Slika 5):



Slika 5. Osnovni principi umjeravanja

U ovom radu korišten je primarni generator vlažnosti koji radi na principu s konstantnim tlakom. Primarni dijelovi ovog generatora su inicijalni ovlaživač, predsaturator i saturator. Saturatorska komora nalazi se u termometrijskoj kupki. Cijevi su izrađene od nehrđajućeg čelika. (Slika 6) Prikazuje shemu mjerne linije za ispitivanje saturatora.



Slika 7. Sustav za pripremu zraka za napajanje saturatora

4.2. Formulacije

Maseni udio vodene pare u saturatoru je izražen temperaturom i tlakom zraka u saturatoru:

$$x_{ws} = \frac{f(p_s, t_s)p_w(t_s)}{p_s}$$

$p_w(t_s)$ - tlak zasićenja vodene pare [Pa]

$f(p_s, t_s)$ - faktor povećanja tlaka zasićenja zbog prisutnosti sudioničkih plinova, pri temperaturi i tlaku zasićenja

t_s - temperatura zraka u saturatoru [°C]

p_s - tlak zraka u saturatoru [Pa]

x_{ws} - maseni omjer vodene pare i suhog zraka u saturatoru [$\frac{kg_w}{kg_{sz}}$]

Na izlazu iz saturatora te u neposrednoj blizini osjetnika umjeravanog mjerila injišta/rosišta zraka, molni udio vodene pare u zraku ovisi o temperaturi te tlaku zraka:

$$x_{wd} = \frac{f(p_d, t_d)p_w(t_d)}{p_d}$$

$p_w(t_d)$ - tlak zasićenja vodene pare na mjestu mjerenja [Pa]

$f(p_d, t_d)$ – faktor povećanja tlaka zasićenja pri temperaturi i apsolutnom tlaku zraka na mjestu mjerenja

t_d – temperatura zraka na mjestu mjerenja [°C]

p_d – tlak zraka na mjestu mjerenja [Pa]

x_{wd} – količinski udio vodene pare na mjestu mjerenja [$\frac{kg_w}{kg_{sz}}$]

Uz pretpostavku da molekule zraka nisu apsorbirane na stjenkama cijevi ili u praznim prostorima na putu od saturatora do osjetnika umjeravanog higrometra točke rose, količinski udio vodene pare ostaje nepromijenjen:

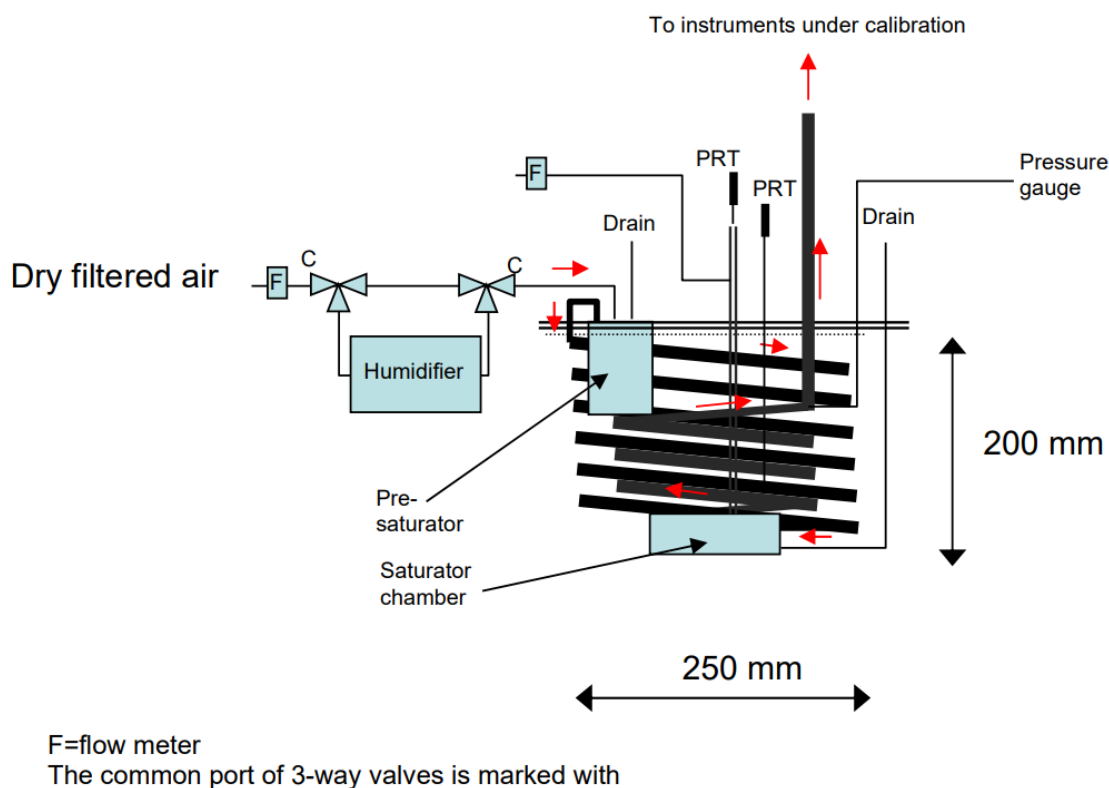
$$x_{ws} = x_{wd}$$

$$f(p_d, t_d)p_w(t_d) = \frac{p_d}{p_s} f(p_s, t_s)p_w(t_s)$$

Jednadžba pokazuje da je za određivanje temperature rošenja na mjestu mjerenja potrebno poznavati temperaturu i tlak zraka u saturatoru te tlak na mjestu mjerenja.

4.3. Niskotemperaturni saturator

Niskotemperaturni saturator (slika 8) dizajniran je da pokrije raspon rosišta od $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $5\text{ }^{\circ}\text{C}$.



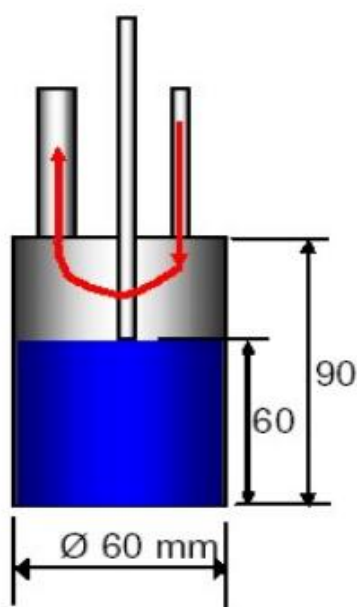
Slika 8. Niskotemperaturni saturator

Za određivanje temperature zraka u saturatoru koriste se dva do tri platinska otpornička osjetnika. Jedan od osjetnika nalazi se u saturacijskoj komori da bi omogućio praćenje temperature smrzavanja vode u komori, dok je drugi uronjen u alkoholnu kupku u blizini cijevnih izmjenjivača topline.

Zrak se u ovlaživaču i predsaturatoru najprije ovlažuje do rosišta koje je nešto veće od temperature saturatora (željenog rosišta). Zrak se zatim suši prolazeći kroz izmjenjivač topline izveden u obliku cijevne zavojnice. Potpuno zasićenje osigurano je dovođenjem zraka u direktan kontakt s vodom ili ledenom površinom u komori saturatora. Zrak se iz komore odvodi kroz kratku cijevnu zavojnicu kojom se sprječava naknadna kondenzacija.

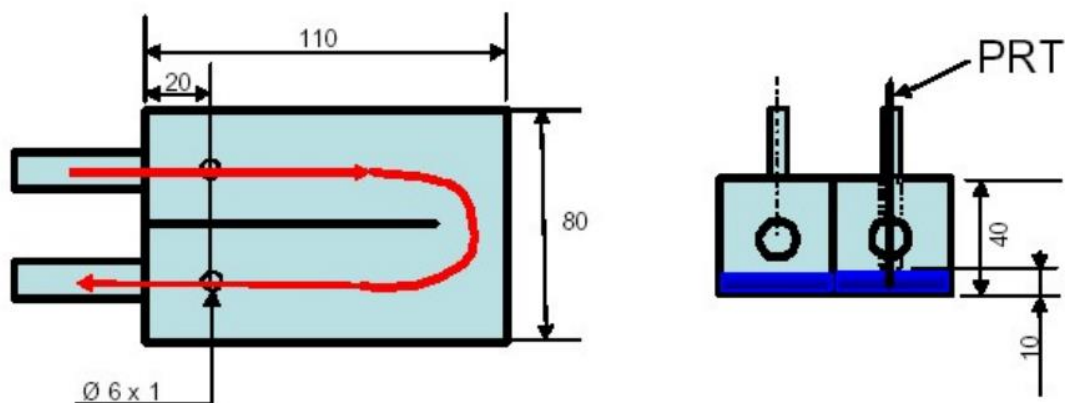
Ovlaživač se sastoji od by-pass cijevi i spremnika vode s ON/OFF ventilom. Ventil se otvara ako je ovlaživanje potrebno. Dio dobavnog zraka prolazi kroz spremnik i miješa se sa suhim zrakom iz by-passa.

Predsaturator (Slika 9) okomita je cilindrična posuda, djelomično uronjena u tekućinu kupke. Predsaturator se može jednostavno napuniti kroz zasebnu cijev. I ulazna i izlazna cijev ugrađene su u poklopac posude. Led ili voda djelomično ispunjava predsaturator. Razina leda je fiksirana razinom vode kad je temperatura saturatura iznad 0 °C. Razinu vode fiksira kraj odvodne cijevi u sredini saturatora.



Slika 9. Predsaturator

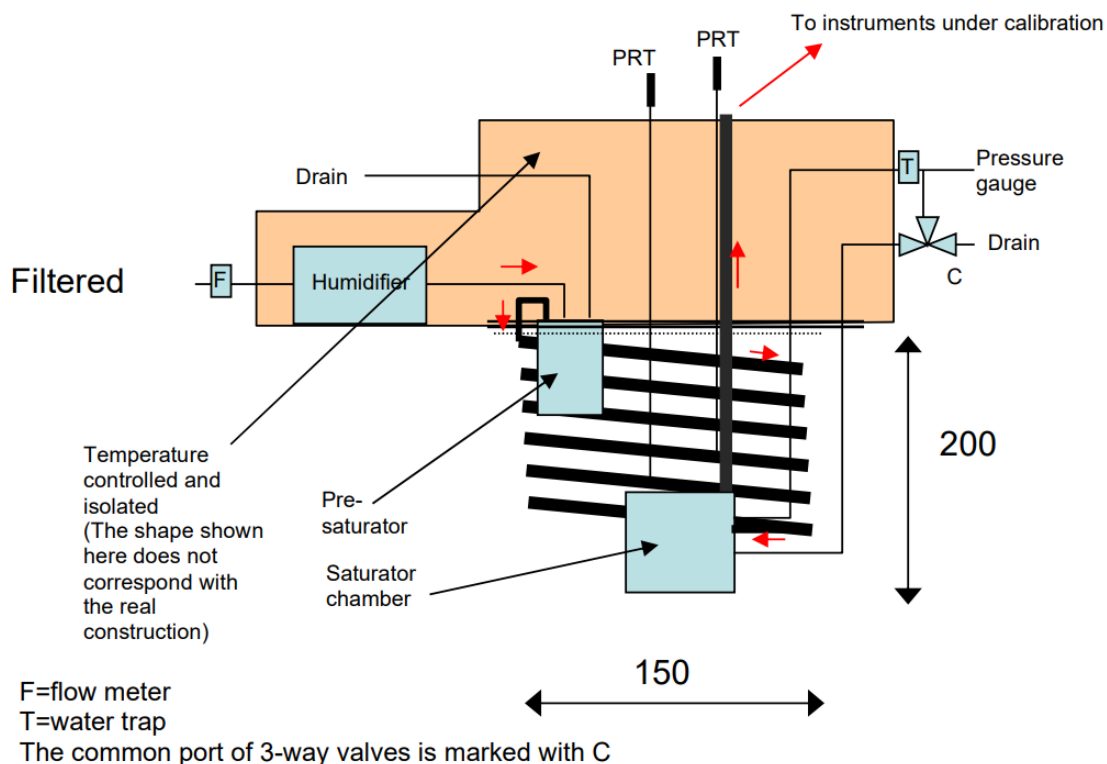
Saturacijska komora (Slika 10) je vodoravna posuda u kojoj led (ili voda) zauzima dno. Razina leda (ili vode) je fiksirana isto kao i kod predsaturatora. Odvodna cijev se također koristi za mjerenje tlaka zraka u komori. U komori se nalazi još jedna cijev kroz koju se ubacuje tanki otpornički osjetnik kojim se mjeri temperatura vode ili leda u komori.



Slika 10. Saturacijska komora

4.4. Visokotemperaturni saturator

Visokotemperaturni saturator (Slika 11) konstruiran je za rad u temperaturnom rasponu rosišta od 1 °C do 60 °C.



Slika 11. Visokotemperaturni saturator

Pošto saturator radi s rosištima koji je viši od temperature okoliša, svi dijelovi i cijevi koji nisu uronjeni u kupku moraju biti grijani i toplinski izolirani. Temperatura u grijanom kućištu kontrolirana je sustavom grijanja koji se sastoji od grijača, ventilatora, termometra i regulatora.

Kod generiranja zraka s rosištem iznad sobne temperature, za povezivanje saturatora i umjeravanog higrometra potrebno je koristiti grijane cijevi te osigurati grijanje svih spojeva cijevi.

Najprije se filtrirani zrak ovlažuje do temperature rošenja, koja je viša od temperature saturacijske komore. Inicijalni ovlaživač je pravokutna posuda djelomično napunjena vodom, smještena unutar grijanog kućišta. Nakon izlaska iz početnog ovlaživača, zrak ulazi u predsaturator gdje se suši do temperature rošenja, koja je malo viša od temperature saturacijske komore. Visokotemperaturni predsaturator je u potpunosti uronjen u kupku s razinom vode nešto nižom nego u niskotemperaturnom predsaturatoru. Razlog je to što niskotemperaturni predsaturator ovlažuje zrak a visokotemperaturni uklanja višak vode.

U cijevnom izmjenjivaču, zrak se dovodi u temperaturnu ravnotežu s vodom u kupki, što uzrokuje kondenziranje male količine vodene pare u izmjenjivaču. Nakon prolaska kroz izmjenjivač topline, temperatura rošenja zraka je otprilike jednaka temperaturi zraka u saturatoru, odnosno zrak je potpuno zasićen.

Potpuno zasićenje zraka osigurano je njegovim prolaskom preko vodene površine u komori saturatora. Komora saturatora je horizontalna posuda koja je slična komori niskotemperaturnog saturatora. U komoru saturatora ulaze dvije vertikalne cijevi. Jedna cijev je namijenjena za kontroliranje razine vode u saturatoru, dok druga omogućuje mjerenje tlaka zraka unutar saturatora.

Ovlaženi zrak kroz vertikalnu cijev izlazi iz komore saturatora. Izlazna cijev je također grijana kako bi se spriječila kondenzacija ovlaženog zraka. Zbog istog je razloga grijana i izlazna cijev zraka iz kućišta.

Za određivanje temperature zraka u saturatoru, koriste se dva precizna platinska otpornička osjetnika temperature i prosječna vrijednost njihovih očitavanja. Oba termometra su uronjena u kupku kroz provrte na grijanom kućištu saturatora.

5. UMJERAVANJE

5.1. Mjerenja

Mjerenja se provode pri rosištima/injištima koja su dogovorena s naručiteljem umjeravanja. Umjeravanje se u većini slučajeva izvodi redosljedom od najnižeg prema najvišem injištu/rosištu. Umjeravanje u nominalnoj točki 0 °C, provodi se na temperaturi 1 °C kako bi se izbjegli problemi promjene agregatnog stanja između vode u kapljevitom i krutom agregatnom stanju. Točkama injišta od -10 °C do 0 °C pristupa se uzlazno, počevši s puno nižom temperaturom da bi se spriječilo pothlađivanje vode (kada je voda u tekućem agregatnom stanju i na temperaturama nižim od 0 °C) i osigurao led, te da bi se slijedio redosljed od nižih prema višim temperaturama.

Radi određivanja ponovljivosti mjerenja potrebno je provesti višestruko ponavljanje mjerenja u istoj točki. U području ispod 0 °C, homogeni sloj leda prekriva zrcalo umjeravanog i kontrolnog higrometra, i mora se otkloniti i ponovno formirati kod svakog ponovljenog mjerenja.

Tokom mjerenja se također bilježe tlak i temperatura okoline. Prije početka umjeravanja potrebno je očistiti ogledalo higrometra alkoholom i destiliranom vodom visoke čistoće.

U svakoj točki umjeravanja potrebno je:

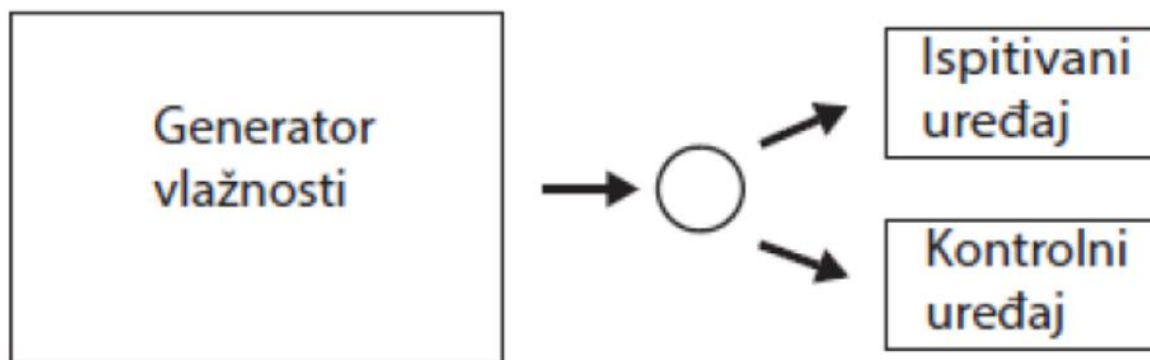
- Pričekati stabilizaciju generatora i higrometra
- Ako je moguće, ručno optimizirati debljinu sloja kondenzata/inja na ogledalu
- Ako je primjenjivo, provjeriti je li sloj kondenzata/inja na zrcalu homogen i zabilježiti promatranje
- pratiti očitavanja na ekranima umjeravanog i kontrolnog higrometra te snimiti najmanje 30 očitavanja u periodu od najmanje 30 minuta nakon što se sustav stabilizirao
- kontinuirano mjeriti tlak zraka u saturatoru te na izlazu iz umjeravanog higrometra
- kontinuirano mjeriti temperaturu i tlak zraka u prostoriji u kojoj se provodi umjeravanje
- mjeriti protok zraka na ulazu u mjerni sustav te na svim izlazima iz njega

- prije mjerenja u slijedećim točkama, kondenzat na zrcalu obaju higrometara mora biti uklonjen i ponovno formiran pomoću funkcije "mirror cleaning"

Na kraju umjeravanja uvijek ugrijati zrcala prije zaustavljanja protoka zraka kroz higrometre kako bi se s njih uklonio sloj kondenzata . Kada se isključi higrometar, pusti se zrak da protiče kroz sustav 5 do 10 minuta.

5.2. Umjeravanje

Iz Primarnog generatora injišta/rosišta nakon zasićenja zrak se vodi do umjeravanog osjetnika točke rose. Umjeravanjem se uspoređuje temperatura zasićenog zraka u komori saturatora direktno s injištem/rosištem izmjerenim pomoću umjeravanog higrometra točke rose. Referentna vrijednost injišta/rosišta zraka dobiva se mjerenjem temperature zasićenja, odnosno temperature zraka u saturacijskoj komori. U toku mjerenja tlak se drži na razini malo iznad atmosferskog kako bi u slučaju propuštanja zasićeni zrak izlazio u prostoriju a ne obrnuto. Mjeri se pad tlaka između saturatora i osjetnika umjeravanog higrometra, kako bi se rezultati mjerenja mogli korigirati s obzirom na pad tlaka. Za slučaj da je temperatura rošenja blizu ili iznad temperature okoliša, cijevi kroz koje zrak prolazi morali bi biti grijani. (Slika 12) prikazuje pojednostavljenu shemu.



Slika 12. Pojednostavljena shema mjernog sustava za umjeravanje higrometara pomoću primarnih generatora vlažnosti

6. MJERNE NESIGURNOSTI

6.1. Procjena mjerne nesigurnosti

Procjenu mjernih nesigurnosti provodimo jer mjerenja nisu savršena te kako ne bi došlo do pogrešnog shvaćanja rezultata umjeravanja.

Glavni koraci za procjenu mjerne nesigurnosti:

1. Odredite što želite otkriti mjerenjem te moguće izvore nesigurnosti.
2. Provedite mjerenja.
3. Procijenite nesigurnosti pojedine ulazne veličine te svaku iskažite na isti način (normalna razdioba s istom razinom pouzdanosti).
4. Odlučite jesu li pogreške ulaznih veličina neovisne jedna o drugoj. Ako nisu onda su potrebne dodatne informacije i proračuni.
5. Izračunajte rezultat mjerenja.
6. Odredite složenu standardnu mjernu nesigurnost kao zbirni rezultat svih utjecaja.
7. Izrazite nesigurnost preko faktora pokrivanja s veličinom intervala nesigurnosti, te naznačite nivo pouzdanosti.
8. Iskažite mjerni rezultat i nesigurnost te naznačite koji su utjecajni faktori uzeti u obzir.

6.1.1. Procjena mjerne nesigurnosti tipa A

Mjerna nesigurnost Tip A temelji se na statičkoj analizi niza ponovljenih mjerenja. U većini slučajeva najbolja je moguća procjena očekivanja veličine q za koju je u istim mjernim uvjetima dobiveno n neovisnih promatranja q_k aritmetička sredina ili prosjek \bar{q} tih n opažanja

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k$$

Eksperimentalna varijanca $s^2(q_k)$, daje procjenu varijance razdiobe vjerojatnosti veličine q_k :

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2$$

Najbolja procjena nesigurnosti srednje vrijednosti \bar{q} je eksperimentalna varijancija srednje vrijednosti:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n}$$

Eksperimentalnu standardnu devijaciju srednje vrijednosti daje pozitivan drugi korijen eksperimentalne varijacije. Standardna nesigurnost $u(\bar{q})$ jednaka je eksperimentalnoj standardnoj devijaciji srednje vrijednosti:

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q})$$

Te za n opažanja dobivamo izraz za standardnu mjernu nesigurnost tipa A:

$$u_A = \frac{s_p}{\sqrt{n}}$$

u_A - standardna nesigurnost tipa A

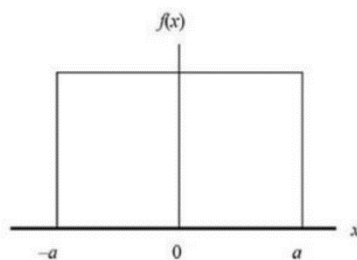
s_p - standardna devijacija

6.1.2. Procjena mjerne nesigurnosti tipa B

Procjena standardne nesigurnosti tipa B bazira se na nestatističkoj analizi niza promatranja. Ovakav tip procjene zahtjeva znanstvenu prosudbu koja se temelji na svim raspoloživim podacima kao što su:

- Podaci prethodnih mjerenja
- Iskustvo i znanje o utjecajnim instrumentima i tvarima
- Specifikacije proizvođača
- Iskustvena saznanja

U velikom broju slučajeva procjena nesigurnosti tipa B se temelji na podacima iz specifikacija proizvođača opreme, potvrda o umjeravanjima instrumenata, priručnika ili nekih drugih izvora. Ukoliko su za određeni instrument poznate samo granične pogreške $\pm a$, te nema nikakvih podataka o distribuciji mjerne vrijednosti unutar tih granica, pretpostavlja se ista vjerojatnost pojavljivanja izmjerene veličine unutar intervala $\pm a$. Takva je razdioba pravokutna (Slika 13).



Slika 13. Pravokutna razdioba

Mjerna nesigurnost izmjerene veličine iskazuje se standardnim odstupanjem, pa se nesigurnost tipa B kod procjene na temelju granične pogreške određuje pomoću jednadžbe:

$$u_B = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

6.2. Proširena mjerna nesigurnost

Proširena mjerna nesigurnost obuhvaća interval oko mjernog područja za koji se može pretpostaviti da sadrži veliki dio razdiobe vrijednosti koja bi se mogla pripisati mjernoj veličini. Proširena mjerna nesigurnost dobivena je umnoškom faktora pokrivanja k te složenom standardnom nesigurnošću $u_c(y)$:

$$U = k \cdot u_c(y)$$

U - proširena mjerna nesigurnost

$u_c(y)$ - složena standardna nesigurnost

k - faktor pokrivanja

Faktor pokrivanja k bira se proizvoljno s obzirom na vjerojatnost koju želimo ostvariti. U mjeriteljstvu se najčešće uzima $k = 2$ koji nam osigurava vjerojatnost od 95%.

6.3. Mjerne nesigurnosti kod umjeravanja higrometra točke rose pomoću primarnog generatora vlažnog zraka

Glavni doprinosi nesigurnosti pri umjeravanju mjerila injišta/rošišta zraka pomoću primarnih generatora u FSB-LPM-u povezani su sa:

- Mjerenjem temperature zraka u saturatoru
- Mjerenjem pada tlaka između saturatora i umjeravanog higrometra
- Nesigurnostima uzrokovanim umjeravanim higrometrom

6.3.1. Mjerilo temperature zraka u saturatoru

- $u(t_{s\,mea})$ – Standardna nesigurnost određena na temelju najmanje 30 očitavanja temperature zraka u saturacijskoj komori u trajanju od najmanje 30 minuta od vremena stabilizacije generatora. Standardna nesigurnost računa se iz n očitavanja saturacijske temperature $t_{s\,mea}$ mjerene termometrima uronjenim u kupku i u saturator:

$$t_{s\,mea} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_{s\,mea\,i} - \bar{t}_{s\,mea})^2}{n(n-1)}}$$

Gdje je $t_{s\,mea\,i}$ jedno očitavanje od t_s , dok $\bar{t}_{s\,mea}$ predstavlja srednju vrijednost n očitavanja (u ovom radu je $n=30$).

- $u(t_{s\,PRT\,cal})$ – nesigurnost umjeravanja platinskih otporničkih osjetnika temperature (PRT-a)
- $u(t_{s\,PRT\,drift})$ – nesigurnost zbog dugoročne stabilnosti PRT-a
- $u(t_{s\,PRT\,self\,heat})$ – nesigurnost zbog samozagrijavanja PRT-a
- $u(t_{s\,PRT\,heat\,flux})$ - nesigurnost zbog dubine uranjanja, tj. utjecaj toplinskog toka kroz zaštitnu cijev termometra do PRT-a

6.3.2. Termometrijski otpornički most

- $u(t_{s \text{ BRIDGE } cal})$ - nesigurnost umjeravanja termometrijskog otporničkog mosta
- $u(t_{s \text{ BRIDGE } res})$ - nesigurnost zbog rezolucije termometrijskog otporničkog mosta
- $u(t_{s \text{ BRIDGE } drift})$ - nesigurnost zbog dugoročne stabilnosti termometrijskog otporničkog mosta

6.3.3. Saturator

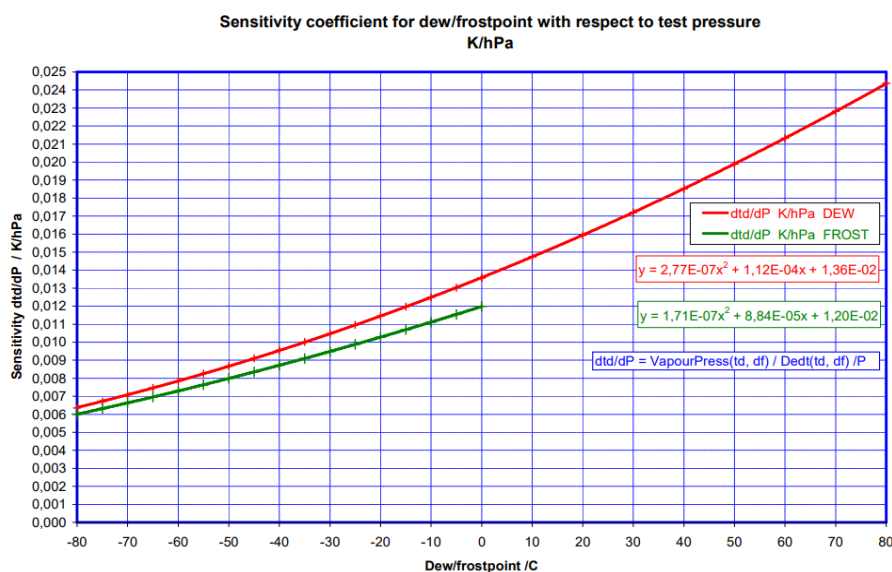
- $u(t_{s \text{ unif}})$ - nesigurnost zbog temperaturnih gradijenata u komori saturatora
- $u(t_{s \text{ eff}})$ - nesigurnost zbog neidealnosti saturatora. Uzima u obzir učinkovitost saturacije i absorpciju/desorpciju vodene pare na stijenka komore saturatora.
- $u(t_{s \text{ bath } unif})$ - nesigurnost mjerenja temperature u radnom volumenu kupke
- $u(t_{s \text{ stability}})$ - nesigurnost stabilnosti temperature zraka u komori saturatora
- $u(t_{s \text{ water}})$ - nesigurnost zbog onečišćenja vode u komorama saturatora
- $u(t_{s \text{ air}})$ - nesigurnosti zbog onečišćenja zraka

6.3.4. Tlak zraka u saturatoru

Kako tlak zraka pada na putu od saturatora do umjeravanog higrometra, temperatura rošenja također pada sudeći po koeficijentu osjetljivosti temperature rošenja na tlak:

$$C_p = \frac{\partial t_d}{\partial p} , \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{mbar}}$$

Vrijednosti C_p u rasponu od -80°C do 80°C prikazani su u sljedećem grafu (Slika 14)



Slika 14. Koeffcijent osjetljivosti

Kada su tlak zraka u komori saturatora i tlak zraka u neposrednoj blizini osjetnika higrometra izmjereni istim instrumentom, mjerna nesigurnost i nestabilnost se mogu zanemariti, pošto nas zanima samo razlika, a ne i apsolutan iznos tlaka na mjestima mjerenja.

- $u(P_{s\ meas})$ - nesigurnost izmjerenog tlaka zraka u komori saturatora
- $u(P_{s\ cal})$ - nesigurnost umjeravanja mjerila apsolutnog tlaka zraka u saturatoru
- $u(P_{s\ res})$ - nesigurnost rezolucije mjerila apsolutnog tlaka zraka u saturatoru
- $u(P_{s\ drift})$ - nesigurnost zbog moguće promjene karakteristike mjerila tlaka u periodu između dva umjeravanja
- $u(P_{s\ aero\ head})$ - nesigurnost zbog razlike visina komore saturatora i osjetnika za mjerenje tlaka
- $u(P_{s\ stability})$ - Nesigurnost zbog nestabilnosti tlaka zraka u saturatoru

6.3.5. Tlak u blizini osjetnika injišta/rošišta

- $u(P_{d\ meas})$ - nesigurnost tlaka izmjerenog u blizini osjetnika injišta/rošišta zraka
- $u(P_{d\ cal})$ - nesigurnost umjeravanja mjerila apsolutnog tlaka korištenog u blizini osjetnika injišta/rošišta zraka
- $u(P_{d\ res})$ - nesigurnost rezolucije mjerila apsolutnog tlaka zraka korištenog u blizini osjetnika injišta/rošišta zraka
- $u(P_{d\ drift})$ - nesigurnost zbog moguće promjene karakteristike mjerila tlaka u periodu između dva umjeravanja
- $u(P_{s\ aero\ head})$ - nesigurnost zbog razlike visina osjetnika injišta/rošišta zraka i osjetnika za mjerenje tlaka
- $u(P_{s\ stability})$ - nesigurnost zbog nestabilnosti tlaka u blizini osjetnika injišta/rošišta zraka

6.3.6. Umjeravani higrometar

- $u(t_{d\ meas\ DUT})$ - standardna nesigurnost za barem 30 očitavanja u periodu od barem 30 minuta mjerenih od početka stabilizacije sustava

$$t_{DUT\ mea} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_{DUT\ mea\ i} - \bar{t}_{DUT\ mea})^2}{n(n-1)}}$$

- $u(t_{DUT\ res})$ - nesigurnost zbog rezolucije higrometra
- $u(t_{DUT\ res})$ - nesigurnost zbog histereze higrometra
- $u(t_{DUC\ stability})$ – nesigurnost zbog kratkotrajne nestabilnosti tijekom umjeravanja higrometra

7. ANALIZA REZULTATA

7.1. Umjeravanje higrometra točke rose s hlađenim ogledalom

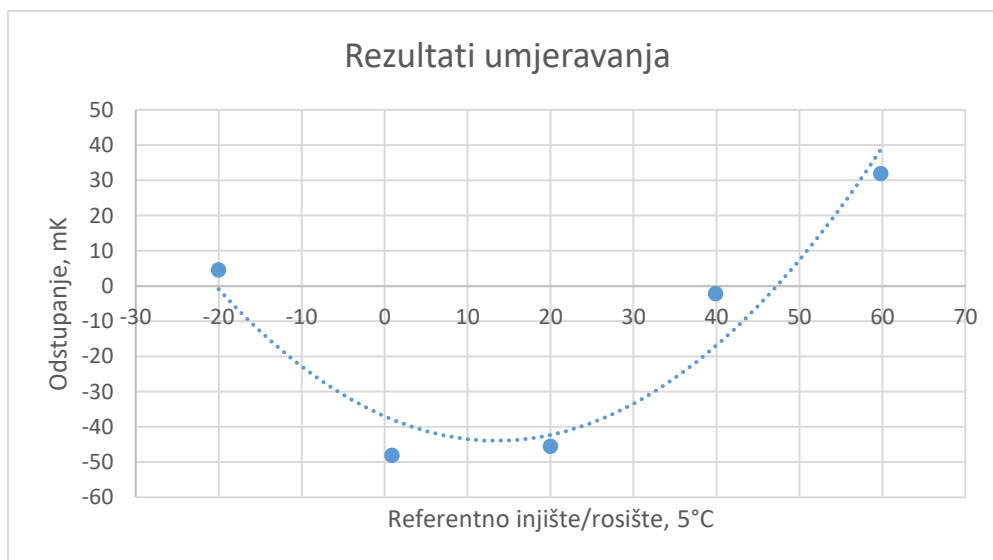
U sljedećim tablicama i grafovima su prikazani rezultati umjeravanja higrometra točke rose s hlađenim ogledalom.

7.1.1. Higrometar MBW 373H

U (Tablica 1) prikazano je odstupanje temperature rošenja koju higrometar pokazuje na ekranu od referentne temperature rošenja.

MBW 373H	referentno rosište	odstupanje
°C	°C	mK
-20,012	-20,017	5
0,826	0,874	-48
19,945	19,991	-46
39,910	39,912	-2
59,858	59,826	32

Tablica 1. Vrijednosti odstupanja umjeravanog higrometra MBW 373H u odnosu na referentno rosište/injište



Slika 15. Grafički prikaz odstupanja umjeravanog higrometra MBW 373H u odnosu na referentno rosište/injište

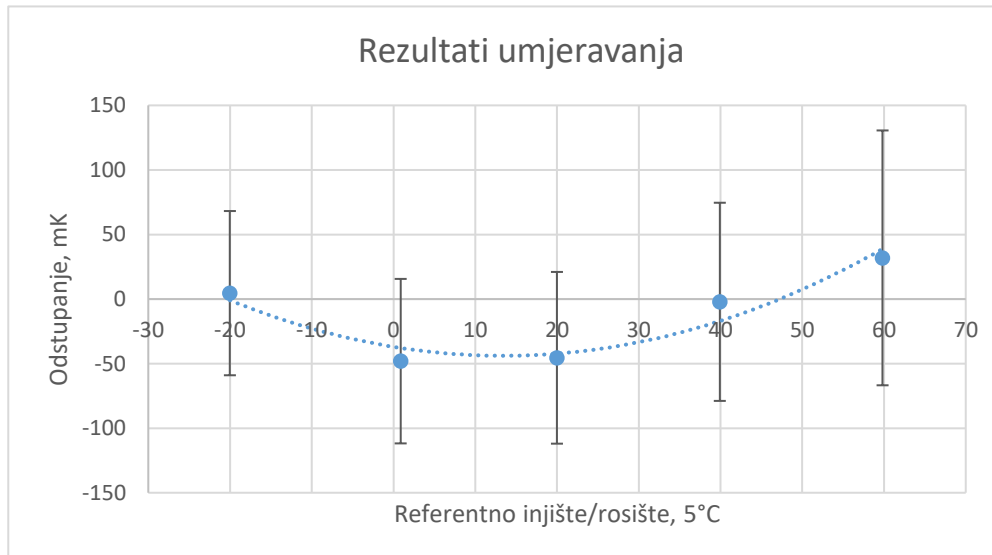
7.2. Proširena nesigurnost umjeravanja

Proširena nesigurnost umjeravanja u pojedinoj umjernoj točki dobiva se množenjem standardne mjerne nesigurnosti s faktorom pokrivanja. Pouzdanost iznosi 95%. Faktor pokrivanja uzima u obzir nesigurnosti etalona, metode umjeravanja i umjeravanog higrometra.

Umjeravanjem su dobiveni sljedeći podaci (Tablica 2)

MBW 373H	referentno rosište	odstupanje	Proširena nesigurnost umjeravanja ($k=2$)
°C	°C	mK	mK
-20,012	-20,017	5	64
0,826	0,874	-48	64
19,945	19,991	-46	67
39,910	39,912	-2	77
59,858	59,826	32	99

Tablica 2. Proširena nesigurnost umjeravanja higrometra MBW 373H



Slika 16. Grafički prikaz proširenih mjernih nesigurnosti za higrometar MBW 373H

7.3. Budžet mjerne nesigurnosti

Budžet nesigurnosti umjeravanja higrometra točke rose izrađuje se za svaku točku posebno počevši od temperature rošenja od -20°C do temperature rošenja od 60°C

Uncertainty budget for dew-point temperature at DUT - Procedure: Dew-point generation (DPG)									
Quantity		Estimation		Standard uncertainty		Probability distribution	Sensitivity coeff.		$u(t_d)$ °C
Description	Symbol	value	unit	value	unit		value	unit	
Saturation temperature									
Measured saturation temperature	$t_{s \text{ meas}}$	-19,978	°C	0,001	K	normal (1 σ)	1	[-]	0,0011
Thermometer (Pt 100)									
Calibration of PRT	$u(t_{s \text{ PRT cal}})$	0	mK	7,8	mK	normal (2 σ)	1	[-]	0,0039
Long-term stability (drift) of PRT	$u(t_{s \text{ PRT drift}})$	0	mk	11,1	mK	rectangular	1	[-]	0,0064
Self-heating and hysteresis (I=1 mA)	$u(t_{s \text{ PRT self heat}})$	0	mk	14,7	mK	rectangular	1	[-]	0,0085
Heat flux along the PRT stem (immersion)	$u(t_{s \text{ PRT heat flux}})$	0	mk	5	mK	rectangular	1	[-]	0,0029
Resistance bridge(F700+EOFIX05)									
RB Linearity	$u(t_{s \text{ Bridge cal}})$	0	ppm	2	ppm	normal (2 σ)	0,000981246	°C/ppm@tS	0,0010
RB Resolution	$u(t_{s \text{ Bridge res}})$	0	ppm	1	ppm	rectangular	0,000981246	°C/ppm@tS	0,0003
RB AC/DC		0	ppm	2	ppm	rectangular	0,000981246	°C/ppm@tS	0,0011
RB internal insul leakage		0	mK	1	mK	normal (1 σ)	1	[-]	0,0010
RS Calibration		99,99967	Ω	0,4	ppm	normal (2 σ)	0,00022959	°C/ppm@tS	0,0000
RS drift		0	Ω	0,1	ppm	rectangular	0,00022959	°C/ppm@tS	0,0000
RS temperature stability	$u(t_{s \text{ Bridge drift}})$	0	Ω	0,0002	m Ω	rectangular	2,295904417	°C/ Ω @tS	0,0003
Saturator									
Saturator temp. gradients	$u(t_{s \text{ unit}})$	0	mK	10,4	mK	rectangular	1	[-]	0,0060
Saturator "efficiency"	$u(t_{s \text{ air}})$	0	mK	31,2	mK	rectangular	1	[-]	0,0180
Bath temperature gradients (uniformity)	$u(t_{s \text{ bath unit}})$	0	mK	11,5	mK	rectangular	1	[-]	0,0066
Stability of saturator temperature	$u(t_{s \text{ stability}})$	0	mK	8,7	mK	rectangular	1	[-]	0,0025
Water contamination	$u(t_{s \text{ water}})$	0	mK	1,8	mK	rectangular	1	[-]	0,0010
Air /gas (nitrogen) contamination	$u(t_{s \text{ air}})$	0	mK	2	mK	rectangular	1	[-]	0,0012
Other effects (tubing, pressure corr., resistance meas., etc.)		0	mK	30	mK	rectangular	1	[-]	0,0173
Pressure in saturator									
Measured saturation pressure	$u(P_{s \text{ meas}})$	1020,28	mbar	0,250	mbar	normal (1 σ)	0,01	°C/mbar	0,0025
Calibration	$u(P_{s \text{ cal}})$	0	mbar	0,06	mbar	normal (2 σ)	0,01	°C/mbar	0,0003
Resolution	$u(P_{s \text{ res}})$	0	mbar	0,01	mbar	rectangular	0,01	°C/mbar	0,0000
Drift	$u(P_{s \text{ drift}})$	0	mbar	0,5	mbar	rectangular	0,01	°C/mbar	0,0029
Aerostatic head to sat. pressure monitor	$u(P_{s \text{ aero head}})$	0	mbar	0,06	mbar	rectangular	0,01	°C/mbar	0,0003
Stability of saturator pressure	$u(P_{s \text{ stability}})$	0	mbar	1	mbar	rectangular	0,01	°C/mbar	0,0058
Pressure at DUT									
Measured pressure at DUT	$u(P_{d \text{ meas}})$	1016,40	mbar	0,232	mbar	normal (1 σ)	0,01	°C/mbar	0,0023
Calibration	$u(P_{d \text{ cal}})$	0	mbar	0,06	mbar	normal (2 σ)	0,01	°C/mbar	0,0003
Resolution	$u(P_{d \text{ res}})$	0	mbar	0,01	mbar	rectangular	0,01	°C/mbar	0,0000
Drift	$u(P_{d \text{ drift}})$	0	mbar	0,5	mbar	rectangular	0,01	°C/mbar	0,0029
Aerostatic head to DUT pressure monitor	$u(P_{d \text{ aero head}})$	0	mbar	0,06	mbar	rectangular	0,01	°C/mbar	0,0003
Stability of DUT pressure	$u(P_{d \text{ stability}})$	0	mbar	1	mbar	rectangular	0,01	°C/mbar	0,0058
Pressure difference $\Delta P = P_d - P_s$	ΔP	-3,88	mbar						
Dew-point correction for ΔP	Δt_d	-0,039	°C				0,01	°C/mbar	
Hygrometer under calibration (DUT)									
Measured dew-point temperature	$u(t_{DUT \text{ meas}})$	-20,012	°C	0,008	K	normal (1 σ)	1	[-]	0,0078
Resolution	$u(t_{DUT \text{ res}})$	0	°C	0,001	°C	rectangular	1	[-]	0,0003
Hysteresis	$u(t_{DUT \text{ hys}})$	0	°C	0	°C	rectangular	1	[-]	0,0000
Short term stability during calibration	$u(t_{DUT \text{ stability}})$	0	°C	0	°C	rectangular	1	[-]	0,0000
Dew-point at DUT									
	t_d	-20,017	°C				Combined uncertainty, $u(t_d)$		0,0318
							Coverage factor k		2
							Expanded uncertainty $U(t_d)$		0,0636

Tablica 3. Budžet nesigurnosti za rosište -20°C

Uncertainty budget for dew-point temperature at DUT - Procedure: Dew-point generation (DPG)									
Quantity		Estimation		Standard uncertainty		Probability distribution	Sensitivity coeff.		$u(t_d)$ /°C
Description	Symbol	value	unit	value	unit		value	unit	
Saturation temperature									
Measured saturation temperature	$t_{s, \text{mea}}$	0,924	°C	0,002	K	normal (1 σ)	1	[-]	0,0017
Thermometer (Pt 100)									
Calibration of PRT	$u(t_{s, \text{PRT cal}})$	0	mK	8,5	mK	normal (2 σ)	1	[-]	0,0042
Long-term stability (drift) of PRT	$u(t_{s, \text{PRT drift}})$	0	mk	11,1	mK	rectangular	1	[-]	0,0064
Self-heating and hysteresis ($I=1$ mA)	$u(t_{s, \text{PRT self heat}})$	0	mk	14,7	mK	rectangular	1	[-]	0,0085
Heat flux along the PRT stem (immersion)	$u(t_{s, \text{PRT heat flux}})$	0	mk	5	mK	rectangular	1	[-]	0,0029
Resistance bridge(F700+EOFX05)									
RB Linearity	$u(t_{s, \text{Bridge cal}})$	0	ppm	2	ppm	normal (2 σ)	0,000987575	°C/ppm@tS	0,0010
RB Resolution	$u(t_{s, \text{Bridge res}})$	0	ppm	1	ppm	rectangular	0,000987575	°C/ppm@tS	0,0003
RB AC/DC		0	ppm	2	ppm	rectangular	0,000987575	°C/ppm@tS	0,0011
RB internal insul leakage		0	mk	1	mK	normal (1 σ)	1	[-]	0,0010
RS Calibration		99,99967	Ω	0,4	ppm	normal (2 σ)	0,000252069	°C/ppm@tS	0,0001
RS drift		0	Ω	0,1	ppm	rectangular	0,000252069	°C/ppm@tS	0,0000
RS temperature stability	$u(t_{s, \text{Bridge drift}})$	0	Ω	0,0002	m Ω	rectangular	2,520699171	°C/ Ω @tS	0,0003
Saturator									
Saturator temp. gradients	$u(t_{s, \text{unit}})$	0	mK	7,8	mK	rectangular	1	[-]	0,0045
Saturator "efficiency"	$u(t_{s, \text{eff}})$	0	mK	31,2	mK	rectangular	1	[-]	0,0180
Bath temperature gradients (uniformity)	$u(t_{s, \text{bath unit}})$	0	mK	7,1	mK	rectangular	1	[-]	0,0041
Stability of saturator temperature	$u(t_{s, \text{stability}})$	0	mK	15,6	mK	rectangular	1	[-]	0,0045
Water contamination	$u(t_{s, \text{water}})$	0	mK	1,8	mK	rectangular	1	[-]	0,0010
Air /gas (nitrogen) contamination	$u(t_{s, \text{air}})$	0	mK	2	mK	rectangular	1	[-]	0,0012
Other effects (tubing, pressure corr., resistance meas., etc.)		0	mK	30	mK	rectangular	1	[-]	0,0173
Pressure in saturator									
Measured saturation pressure	$u(P_{s, \text{meas}})$	1016,48	mbar	0,225	mbar	normal (1 σ)	0,014	°C/mbar	0,0031
Calibration	$u(P_{s, \text{cal}})$	0	mbar	0,06	mbar	normal (2 σ)	0,014	°C/mbar	0,0004
Resolution	$u(P_{s, \text{res}})$	0	mbar	0,01	mbar	rectangular	0,014	°C/mbar	0,0000
Drift	$u(P_{s, \text{drift}})$	0	mbar	0,5	mbar	rectangular	0,014	°C/mbar	0,0040
Aerostatic head to sat. pressure monitor	$u(P_{s, \text{aero head}})$	0	mbar	0,06	mbar	rectangular	0,014	°C/mbar	0,0005
Stability of saturator pressure	$u(P_{s, \text{stability}})$	0	mbar	1	mbar	rectangular	0,014	°C/mbar	0,0081
Pressure at DUT									
Measured pressure at DUT	$u(P_{d, \text{meas}})$	1012,76	mbar	0,169	mbar	normal (1 σ)	0,014	°C/mbar	0,0024
Calibration	$u(P_{d, \text{cal}})$	0	mbar	0,06	mbar	normal (2 σ)	0,014	°C/mbar	0,0004
Resolution	$u(P_{d, \text{res}})$	0	mbar	0,01	mbar	rectangular	0,014	°C/mbar	0,0000
Drift	$u(P_{d, \text{drift}})$	0	mbar	0,5	mbar	rectangular	0,014	°C/mbar	0,0040
Aerostatic head to DUT pressure monitor	$u(P_{d, \text{aero head}})$	0	mbar	0,06	mbar	rectangular	0,014	°C/mbar	0,0005
Stability of DUT pressure	$u(P_{d, \text{stability}})$	0	mbar	1	mbar	rectangular	0,014	°C/mbar	0,0081
Pressure difference $\Delta P=P_d - P_s$	ΔP	-3,73	mbar						
Dew-point correction for ΔP	Δt_d	-0,052	°C				0,014	°C/mbar	
Hygrometer under calibration (DUT)									
Measured dew-point temperature	$u(t_{\text{DUT meas}})$	0,826	°C	0,002	K	normal (1 σ)	1	[-]	0,0022
Resolution	$u(t_{\text{DUT res}})$	0	°C	0,001	°C	rectangular	1	[-]	0,0003
Hysteresis	$u(t_{\text{DUT hys}})$	0	°C	0	°C	rectangular	1	[-]	0,0000
Short term stability during calibration	$u(t_{\text{DUT stability}})$	0	°C	0	°C	rectangular	1	[-]	0,0000
Dew-point at DUT	t_d	0,872	°C				Combined uncertainty, $u(t_d)$		0,0318
							Coverage factor k		2
							Expanded uncertainty $U(t_d)$		0,0637

Tablica 4. Budžet nesigurnosti za rosište 1 °C

Uncertainty budget for dew-point temperature at DUT - Procedure: Dew-point generation (DPG)									
Quantity		Estimation		Standard uncertainty		Probability distribution	Sensitivity coeff.		$u(t_d)$ / °C
Description	Symbol	value	unit	value	unit		value	unit	
Saturation temperature									
Measured saturation temperature	$t_{s\text{ mea}}$	39,984	°C	0,002	K	normal (1 σ)	1	[-]	0,0024
Thermometer (Pt 100)									
Calibration of PRT	$u(t_{s\text{ PRT cal}})$	0	mK	8,5	mK	normal (2 σ)	1	[-]	0,0042
Long-term stability (drift) of PRT	$u(t_{s\text{ PRT drift}})$	0	mk	7,1	mK	rectangular	1	[-]	0,0041
Self-heating and hysteresis (I=1 mA)	$u(t_{s\text{ PRT Self heat}})$	0	mk	9,7	mK	rectangular	1	[-]	0,0056
Heat flux along the PRT stem (immersion)	$u(t_{s\text{ PRT heat flux}})$	0	mk	5	mK	rectangular	1	[-]	0,0029
Resistance bridge(F700+EOFIX05)									
RB Linearity	$u(t_{s\text{ Bridge cal}})$	0	ppm	2	ppm	normal (2 σ)	0,00099941	°C/ppm@tS	0,0010
RB Resolution	$u(t_{s\text{ Bridge res}})$	0	ppm	1	ppm	rectangular	0,00099941	°C/ppm@tS	0,0003
RB AC/DC		0	ppm	2	ppm	rectangular	0,00099941	°C/ppm@tS	0,0012
RB internal insul leakage		0	mK	1	mK	normal (1 σ)	1	[-]	0,0010
RS Calibration		99,99967	Ω	0,4	ppm	normal (2 σ)	0,000294439	°C/ppm@tS	0,0001
RS drift		0	Ω	0,1	ppm	rectangular	0,000294439	°C/ppm@tS	0,0000
RS temperature stability	$u(t_{s\text{ Bridge drift}})$	0	Ω	0,0002	m Ω	rectangular	2,944395954	°C/ Ω @tS	0,0003
Saturator									
Saturator temp. gradients	$u(t_{s\text{ uni}})$	0	mK	17	mK	rectangular	1	[-]	0,0098
Saturator "efficiency"	$u(t_{s\text{ eff}})$	0	mK	25	mK	rectangular	1	[-]	0,0144
Bath temperature gradients (uniformity)	$u(t_{s\text{ bath uni}})$	0	mK	6,7	mK	rectangular	1	[-]	0,0039
Stability of saturator temperature	$u(t_{s\text{ stability}})$	0	mK	13,8	mK	rectangular	1	[-]	0,0040
Water contamination	$u(t_{s\text{ water}})$	0	mK	1,8	mK	rectangular	1	[-]	0,0010
Air /gas (nitrogen) contamination	$u(t_{s\text{ air}})$	0	mK	2	mK	rectangular	1	[-]	0,0012
Other effects (tubing, pressure corr., resistance meas., equations, etc.)		0	mK	30	mK	rectangular	1	[-]	0,0173
Pressure in saturator									
Measured saturation pressure	$u(P_{s\text{ meas}})$	1015,52	mbar	0,434	mbar	normal (1 σ)	0,018	°C/mbar	0,0078
Calibration	$u(P_{s\text{ cal}})$	0	mbar	0,06	mbar	normal (2 σ)	0,018	°C/mbar	0,0005
Resolution	$u(P_{s\text{ res}})$	0	mbar	0,01	mbar	rectangular	0,018	°C/mbar	0,0001
Drift	$u(P_{s\text{ drift}})$	0	mbar	0,5	mbar	rectangular	0,018	°C/mbar	0,0052
Aerostatic head to sat. pressure monitor	$u(P_{s\text{ aero head}})$	0,03	mbar	0,03	mbar	rectangular	0,018	°C/mbar	0,0003
Stability of saturator pressure	$u(P_{s\text{ stability}})$	0	mbar	1	mbar	rectangular	0,018	°C/mbar	0,0104
Pressure at DUT									
Measured pressure at DUT	$u(P_{d\text{ meas}})$	1011,63	mbar	1,111	mbar	normal (1 σ)	0,018	°C/mbar	0,0200
Calibration	$u(P_{d\text{ cal}})$	0	mbar	0,06	mbar	normal (2 σ)	0,018	°C/mbar	0,0005
Resolution	$u(P_{d\text{ res}})$	0	mbar	0,01	mbar	rectangular	0,018	°C/mbar	0,0001
Drift	$u(P_{d\text{ drift}})$	0	mbar	0,5	mbar	rectangular	0,018	°C/mbar	0,0052
Aerostatic head to DUT pressure monitor	$u(P_{d\text{ aero head}})$	0	mbar	0,03	mbar	rectangular	0,018	°C/mbar	0,0003
Stability of DUT pressure	$u(P_{d\text{ stability}})$	0	mbar	1	mbar	rectangular	0,018	°C/mbar	0,0104
Pressure difference $\Delta P = P_d - P_s$	ΔP	-3,93	mbar						
Dew-point correction for ΔP	Δt_d	-0,071	°C				0,018	°C/mbar	
Hygrometer under calibration (DUT)									
Measured dew-point temperature	$u(t_{\text{DUT meas}})$	39,910	°C	0,004	K	normal (1 σ)	1	[-]	0,0042
Resolution	$u(t_{\text{DUT res}})$	0	°C	0,001	°C	rectangular	1	[-]	0,0003
Hysteresis	$u(t_{\text{DUT hys}})$	0	°C	0	°C	rectangular	1	[-]	0,0000
Short term stability during calibration	$u(t_{\text{DUT stability}})$	0	°C	0	°C	rectangular	1	[-]	0,0000
Dew-point at DUT	t_d	39,913	°C			Combined uncertainty, $u(t_d)$			0,0384
						Coverage factor k			2
						Expanded uncertainty $U(t_d)$			0,0767

Tablica 6. Budžet nesigurnosti za rosište 40 °C

8. ZAKLJUČAK

U sklopu ovog rada provedeno je umjeravanje etalonskog higrometra točke rose MBW 373H. Kao kontrolni instrument upotrijebljen je higrometar MBW 373LHX. Umjeravanje je provedeno u 5 točaka u rasponu rosišta od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ s intervalom od $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Umjeravanje je trajalo 5 dana te su njime dobiveni rezultati odstupanja umjeravanog instrumenta od referentnog rosišta, koji se nalaze u području od -48 mK do 32 mK . Proširenom mjernom nesigurnošću, izračunatom s faktorom pokrivanja $k=2$, dobiveni su rezultati s mjernim nesigurnostima izraženim na razini pouzdanosti od 95%. Proširene nesigurnosti umjeravanja nalaze se u granicama od 64 do 99 mK . Na temelju analize rezultata umjeravanja zaključuje se da je instrument ispravan i spreman za daljnju uporabu mjerenja apsolutne i relativne vlažnosti zraka.

9. LITERATURA

- [1] Galović, A.: *Termodinamika II*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [2] LPM-FSB, Calibration of dew-point hygrometers, 2019.
- [3] Šestan, D., Grgrec Bermanec L., Matas I.: Podloge za predavanja „Mjerenje vlažnosti“, Zagreb, 2022.
- [4] Šestan, D., Grgrec Bermanec L., Matas I.: Podloge za predavanja „Mjerenja u energetici“, Zagreb, 2022.
- [5] Hlušička, A.: „Ispitivanje etalonskih mjerila vlažnosti“ (završni rad), Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [6] Šestan, D.: Doktorski rad „Nova metoda za realizaciju ljestvice injišta/rošišta zraka u temperaturnom području od -70°C do 5°“, Zagreb, 2015.