

# Umjeravanje etalonskog mjerila injišta i rosišta zraka

---

Čerkez, Mia

Master's thesis / Diplomski 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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:463637>

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

# **DIPLOMSKI RAD**

**Mia Čerkez**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Umjeravanje etalonskog mjerila injišta i rosišta zraka**

Mentor:

doc.dr.sc. Danijel Šestan, dipl. ing.

Student:

Mia Čerkez

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se svojem mentoru doc.dr.sc. Danijelu Šestan na ukazanoj pomoći i susretljivosti.

Mia Čerkez



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za 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 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Mia Čerkez** JMBAG: 0035204548

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Umjeravanje etalonskog mjerila injišta i rosišta zraka**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Calibration of standard dew/frost point hygrometer**

Opis zadatka:

Potrebno je provesti postupak umjeravanja etalonskog mjerila injišta i rosišta zraka. Za umjeravanje će se koristiti primarni generatori zraka poznatog injišta i rosišta u Laboratoriju za procesna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu (FSB-LPM). Umjeravanje je potrebno provesti u najmanje pet umjernih točaka kojima će se obuhvatiti raspon injišta i rosišta od  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

U okviru izrade diplomskog rada potrebno je:

- Dati pregled teorijskih osnova vezanih uz princip rada primarnih generatora zraka poznatog injišta/rosišta.
- Opisati postupak provedbe sljedivog umjeravanja mjerila injišta i rosišta zraka.
- Osmisliti i opisati mjerni sustav za predmetno umjeravanje te prikazati shemu spajanja.
- 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 mjerila injišta i rosišta zraka.

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

Zadatak zadan:

17. studenoga 2022.

Zadatak zadao:

  
Doc.dr.sc. Danijel Šestan

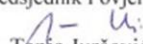
Datum predaje rada:

19. siječnja 2023.

Predvideni datumi obrane:

23.- 27. siječnja 2023.

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD	1
2. Vlažni zrak	2
2.1. Apsolutna i relativna vlažnost	3
2.2. Parcijalni tlak vodene pare	4
2.3. Injište/Rosište zraka	7
2.4. Mjerenje vlažnosti zraka	7
3. PRIMARNI GENERATORI ZRAKA POZNATOG INJIŠTA/ROSIŠTA	11
3.1. Uvod	11
3.2. Princip rada generatora vlažnosti u LPM-u	12
3.3. Niskotemperaturni sturator (LRS)	14
3.5. Visokotemperaturni saturator (HRS)	17
4. POSTUPAK UMJERAVANJA MJERILA INJIŠTA I ROSIŠTA ZRAKA	19
4.1. Uvod	19
4.2. Matematičke osnove	19
4.3. Vizualna kontrola ispitivanog uređaja	22
4.4. Točke umjeravanja	22
4.5. Proces umjeravanja	22
5. MJERNI SUSTAV	24
5.1. Saturatori zraka	25
5.2. Umjeravani higrometar točke rose	26
5.3. Kontrolni higrometar točke rose	27
5.4. Mjerna postaja	29
5.5. Platinski otpornički osjetnici temperature	32
5.6. Termometrijska kupka	32

---

5.7. Sustav za pripremu zraka	34
5.8. Termostatirana komora	35
5.9. Precizni barometar	36
5.10. Računalni programi	37
6. MJERNA NESIGURNOST	39
6.1. Osnove o mjernoj nesigurnosti	39
6.2. Procjena mjerne nesigurnosti	40
6.2.1. Procjena mjerne nesigurnosti - Tip A	41
6.2.2. Procjena mjerne nesigurnosti - Tip B	42
6.2.3. Proširena mjerna nesigurnost	44
6.3. Mjerne nesigurnosti pri umjeravanju točke iništa/rosišta	45
6.3.1. Temperatura saturatora	45
6.3.2. Termometar	46
6.3.3. Otpornički most	46
6.3.4. Saturator	46
6.3.5. Tlak zraka u saturatoru	47
6.3.6. Tlak zraka u neposrednoj blizini umjeravanog osjetnika injišta/rosišta zraka	47
6.3.7. Umjeravani higrometar	48
6.3.8. Rezultat mjerenja	49
7. REZULTATI UMJERAVANJA ETALONSKOG MJERILA INJIŠTA I ROSIŠTA ZRAKA	50
7.1. Rezultati umjeravanja higrometra General Eastern	50
7.2. Proširena mjerna nesigurnost	51
7.3. Budžeti nesigurnosti higrometra	52
9. ZAKLJUČAK	63
LITERATURA	64

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Tipičan sastav zraka temperature 20°C i relativne vlažnosti 50%.....	2
Slika 2. Maksimalan volumni udio vodene pare u zraku u ovisnosti o temperaturi .....	3
Slika 3. Shema pripreme čistog zraka .....	13
Slika 4. Shema termodinamičkog procesa saturatora.....	14
Slika 5. Shema niskotemperaturnog saturatora LRS.....	15
Slika 6. Skica predsaturatora LRS-a .....	16
Slika 7. Shema LRS komore saturatora .....	16
Slika 8. Shema visokotemperaturnog saturatora HRS .....	17
Slika 9. Shema mjerne linije za temperaturno područje od -25 °C do 1 °C .....	24
Slika 10. Shema mjerne linije za temperaturno područje od 10 °C do 60 °C .....	24
Slika 11. Niskotemperaturni saturator.....	25
Slika 12. Visokotemperaturni saturator.....	25
Slika 13. Pokazni uređaj General Eastern M2.....	26
Slika 14. Osjetnik injišta/rosišta General Eastern D-2.....	26
Slika 15. Higrometar točke rose MBW 373 LHX.....	28
Slika 16. Shema osjetnika injišta/rosišta s hladjenim zrcalom.....	29
Slika 17. Mjerna postaja.....	30
Slika 18. Kupka za regulaciju temperature saturatora.....	33
Slika 19. Komponente sustava za pripremu zraka .....	35
Slika 20. Termostatirana komora .....	35
Slika 21. Precizni barometar .....	36
Slika 22. Program za očitavanje temperatura s termometrijskog otporničkog mosta.....	38
Slika 23. Skica pravokutne razdiobe .....	43
Slika 24. Skica normalne razdiobe .....	44
Slika 25. Grafički prikaz odstupanja higrometra GE u odnosu na referentna injišta/rosišta .....	51
Slika 26. Grafički prikaz proširenih mjernih nesigurnosti za higrometar GE.....	52



**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Koeficijenti $a_i$ za Sonntagovu jednadžbu .....	5
Tablica 2. Koeficijenti $A_i$ i $B_i$ u Greenspanovoj jednadžbi.....	6
Tablica 3. Tehničke karakteristike umjeravanog higrometra.....	27
Tablica 4. Tehničke karakteristike kontrolnog higrometra MBW 373 LHX.....	28
Tablica 5. Tehničke karakteristike termometrijskog otporničkog mosta ALS F700 .....	30
Tablica 6. Tehničke karakteristike višekanalne upravljačke jedinice ALS SB148.....	31
Tablica 7. Tehničke karakteristike multipleksora ALS SB158.....	31
Tablica 8. Osjetnici temperature spojeni na višekanalni multipleksor.....	32
Tablica 9. Tehničke karakteristike termometrijske kupke .....	33
Tablica 10. Tehničke karakteristike termometrijske kupke .....	36
Tablica 11. Tehničke karakteristike preciznog barometra Vaisala PTB330.....	37
Tablica 12. Razine povjerenja i faktori proširenja za normalnu razdiobu .....	44
Tablica 13. Vrijednosti odstupanja umjeravanog higrometra GE.....	50
Tablica 14. Vrijednosti proširenih mjernih nesigurnosti za umjeravanje higrometra GE .....	51
Tablica 15. Budžet nesigurnosti za umjernu točku -25 °C .....	53
Tablica 16. Budžet nesigurnosti za umjernu točku -20 °C .....	54
Tablica 17. Budžet nesigurnosti za umjernu točku -10 °C .....	55
Tablica 18. Budžet nesigurnosti za umjernu točku 1 °C .....	56
Tablica 19. Budžet nesigurnosti za umjernu točku 10 °C .....	57
Tablica 20. Budžet nesigurnosti za umjernu točku 20 °C .....	58
Tablica 21. Budžet nesigurnosti za umjernu točku 30 °C .....	59
Tablica 22. Budžet nesigurnosti za umjernu točku 40 °C .....	60
Tablica 23. Budžet nesigurnosti za umjernu točku 50 °C .....	61
Tablica 24. Budžet nesigurnosti za umjernu točku 60 °C .....	62

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$x$	$\text{kg}_w/\text{kg}_{sz}$	sadržaj vlage
$m_w$	$\text{kg}_w$	masa vodene pare
$m_{sz}$	$\text{kg}_{sz}$	masa suhog zraka
$\rho_d$	$\text{kg}_w/\text{m}^3$	apsolutna vlažnost
$V$	$\text{m}^3$	volumen vlažnog zraka
$\varphi$	-	relativna vlažnost
$p_d(\vartheta)$	Pa	parcijalni tlak vodene pare pri temperaturi $\vartheta$
$p_s(\vartheta)$	Pa	parcijalni tlak zasićenja pri temperaturi $\vartheta$
$p$	Pa	ukupni tlak vlažnog zraka
$e_{zas}$	Pa	tlak zasićenja vodene pare
$T$	$^{\circ}\text{C}$	temperatura
$a_i$	-	koeficijenti za Sonntagovu jednadžbu
$f$	-	korekcijski faktor povećanja tlaka zasićenja vodene pare u prisutnosti sudioničkih plinova
$P$	Pa	apsolutni tlak
$T_{inj/ros}$	$^{\circ}\text{C}$	injište/rosište
$A_i, B_i$	-	vrijednosti koeficijenata u Greenspanovoj jednadžbi za faktor povećanja tlaka zasićenja vodene pare u prisutnosti sudioničkih plinova
$p_w(t_s)$	Pa	tlak zasićenja čiste vodene pare na temperaturi saturatora
$f(p_s, t_s)$	-	faktor povećanja tlaka zasićenja vodene pare u prisutnosti sudioničkih plinova, određen pri temperaturi saturatora $t_s$ i tlaku zraka u saturatoru $p_s$
$t_s$	$^{\circ}\text{C}$	temperatura zraka u saturatoru
$p_s$	Pa	tlak zraka u saturatoru
$x_{ws}$	-	količinski udio vodene pare u saturatoru
$p_w(t_d)$	Pa	Tlak zasićenja pri temperaturi injišta/rosišta zraka na mjestu mjerenja (u neposrednoj blizini osjetnika umjeravanog mjerila)
$f(p_d, t_d)$	-	faktor povećanja tlaka zasićenja vodene pare u prisutnosti sudioničkih plinova, određen pri temperaturi injišta/rosišta i

		tlaku zraka na mjestu mjerenja (u neposrednoj blizini osjetnika umjeravanog mjerila)
$t_d$	°C	injište/rošište zraka izmjereno umjeranim instrumentom
$p_d$	Pa	tlak zraka u neposrednoj blizini osjetnika umjeravanog mjerila
$x_{wd}$	-	količinski udio vodene pare na mjestu osjetnika umjeravanog instrumenta
$f$	-	faktor povećanja tlaka zasićenja u prisutnosti sudioničkih plinova
$P_v$	Pa	parcijalni tlak vodene pare u vlažnom zraku
$e$	Pa	tlak zasićenja tekućine ili krutine
$h$	-	relativna vlažnost
$x_o$	kg/kg	molni udio pare
$P_o$	Pa	tlak u blizini osjetnika umjeravanog instrumenta
$t_o$	°C	temperatura zraka
$P_s$	Pa	tlak zasićenja
$t_s$	°C	temperatura zasićenja
$p$	Pa	ukupni tlak zraka
$t$	°C	temperatura uzorka zraka
$e_w(t)$	Pa	tlak zasićene pare u čistoj fazi u odnosu na vodu
$f_w(p, t)$	-	faktor pojačanja za tlak zasićene pare
$e'$	Pa	parcijalni tlak zasićenja vodene pare u vlažnom zraku pri temperaturi zasićenja i tlaku zasićenja
$e'_w(t)$	Pa	tlak zasićenja vodene pare pri ispitnoj temperaturi i ispitnom tlaku
$q_k$	-	pojedinačna opažanja
$\bar{q}$	-	aritmetička sredina ili prosjek
$n$	-	broj neovisnih promatranja
$s^2(q_k)$	-	eksperimentalna varijanca
$s(\bar{q})$	-	eksperimentalna standardna devijacija srednje vrijednosti
$u(\bar{q})$	-	mjerna nesigurnost srednje vrijednosti $\bar{q}$

$u_A$	-	standardna mjerna nesigurnost Tipa A
$s_p$	-	standardna devijacija
$u(x_i)_B^2$	-	procjena varijance Tipa B
$u(x)_B$	-	standardna nesigurnost Tipa B
$U(x)$	-	mjerna nesigurnost
$k_p$	-	faktor prekrivanja
$U$	-	proširena mjerna nesigurnost
$u_c(y)$	-	sastavljena standardna nesigurnost

## SAŽETAK

U okviru izrade diplomskog rada proveden je postupak umjeravanja etalonskog mjerila injišta i rosišta zraka u Laboratoriju za procesna mjerenja (LPM) na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu (FSB). Koristeći uređaje i opremu koja je bila na raspolaganju u LPM-u sastavljene su mjerne linije i provedena su mjerenja. Za umjeravanje su korišteni primarni generatori zraka poznatog injišta i rosišta. U području injišta/rosišta od  $-25\text{ °C}$  do  $1\text{ °C}$  korišten je niskotemperaturni saturator (LRS), a za temperaturno područje od  $1\text{ °C}$  do  $60\text{ °C}$  korišten je visokotemperaturni saturator (HRS). Umjeravanje je provedeno u 10 umjernih točaka, jednoliko raspoređenih unutar mjernog područja instrumenta, kojima je obuhvaćen raspon injišta i rosišta od  $-25\text{ °C}$  do  $60\text{ °C}$ . Dobiveni rezultati umjeravanja prikazani su u radu s pripadnim mjernim nesigurnostima. Umjeravanjem je utvrđeno da se korekcije očitavanja umjeravanog instrumenta, u cijelom mjernom području, kreću u granicama od  $-0.147\text{ °C}$  do  $0.011\text{ °C}$ . Umjeravanja su provedena s proširenim nesigurnostima između  $70\text{ mK}$  i  $96\text{ mK}$  (na razini pouzdanosti od  $95\%$ ). Na temelju rezultata umjeravanja zaključeno je da je instrument i dalje moguće koristiti kao etalonsko mjerilo za umjeravanje mjerila relativne vlažnosti zraka.

**Ključne riječi:** injište/rosište zraka, primarni generatori zraka poznatog injišta/rosišta, niskotemperaturni saturator LRS, visokotemperaturni saturator HRS, procjena mjerne nesigurnosti

## **SUMMARY**

Within this master's thesis, the calibration of a standard dew/frost point hygrometer was performed in the Laboratory for process measurements (LPM) at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb. Using the devices and equipment available in the LPM, including two primary dew/frost point saturators, two measurement systems were assembled and used for calibration. The low-range saturator (LRS) was used in the dew/frost point range between  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and the high-range saturator (HRS) was used in the range between  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Calibration was carried out in 10 calibration points, uniformly distributed within the measurement range of the instrument, covering the dew/frost point range from  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The calibration results are presented in this work, including the corresponding calibration uncertainties. By calibration, it was determined that the corrections of the calibrated instrument readings, in its entire measuring range, lie between  $-0.147\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $0.011\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Calibrations were performed with expanded uncertainties between 70 mK and 96 mK (at a confidence level of 95 %). Based on the calibration results, it was concluded that the instrument can be used as a standard for the calibration of relative humidity instruments.

**Keywords:** dew/frost point, primary dew/frost point generators, low-range saturator (LRS), high-range saturator (HRS), the calibration uncertainty

## 1. UVOD

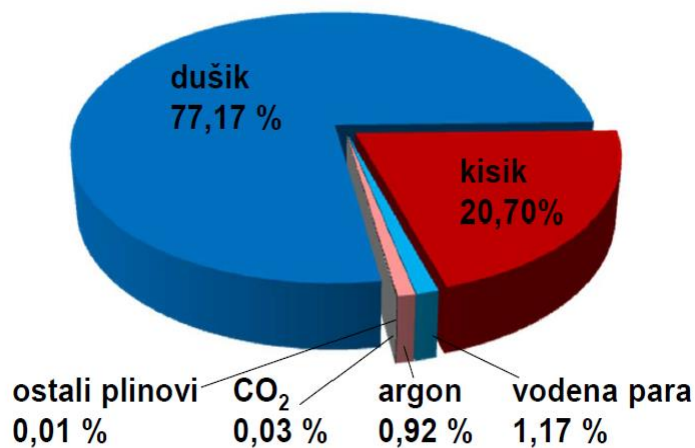
Unutar laboratorija za procesna mjerenja (LPM), koji se nalazi na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, nalaze se državni etaloni za temperaturu, tlak i vlažnost. Područja umjeravana i razine nesigurnosti ovih etalona prilagođeni su raspoloživim resursima i potrebama umjeravanja u Republici Hrvatskoj.

Za umjeravanje etalonskih mjerila injišta i rosišta zraka LPM trenutno koristi dva primarna generatora. Generatori su konstruirani za realizaciju injišta/rosišta u području od  $-70\text{ °C}$  do  $60\text{ °C}$ . Osnovne komponente generatora su niskotemperaturni saturator koji je konstruiran za realizaciju injišta/rosišta u području od  $-70\text{ °C}$  do  $5\text{ °C}$ , i visokotemperaturni saturator za područje rosišta od  $1\text{ °C}$  do  $60\text{ °C}$ . Oba saturatora rade na principu jednog tlaka s jednim prolazom. Karakterizacija oba saturatora provedena je u laboratoriju zavoda za mjeriteljstvo Republike Finske (MIKES) kao i u LPM-u. Rezultati karakterizacija pokazuju da su oba saturatora dovoljno učinkovita za primarnu realizaciju injišta/rosišta u rasponu od  $-70\text{ °C}$  do  $60\text{ °C}$ , pri protocima u rasponu od 1 l/min do 2.5 l/min. Procijenjene standardne nesigurnosti zbog neidealne učinkovitosti zasićenja su između  $0,02\text{ °C}$  i  $0,05\text{ °C}$ . [1]

U okviru izrade diplomskog rada navedeni generatori su korišteni za sljedivo umjeravanje etalonskog higrometra točke rose, koji će se u LPM-u potom koristiti za provedbu umjeravanja mjerila relativne vlažnosti zraka. U tu svrhu najprije je osmišljena i sastavljena mjerna linija, pri čemu su korišteni instrumenti i oprema kojom raspolaže Laboratorij za procesna mjerenja. Za generiranje zraka poznatog injišta/rosišta u rasponu od  $-25\text{ °C}$  do  $1\text{ °C}$  korišten je niskotemperaturni saturator (LRS), dok je za raspon od  $1\text{ °C}$  do  $60\text{ °C}$  korišten visokotemperaturni saturator (HRS). Umjeravanje je provedeno u deset umjernih točaka koje su jednoliko raspoređene unutar mjernog raspona umjeravanog instrumenta. U radu je dan pregled teorijskih osnova vezanih uz princip rada primarnih generatora zraka poznatog injišta/ rosišta te je opisan postupak provedbe sljedivog umjeravanja mjerila injišta i rosišta zraka, kao i korišteni mjerni sustav. U radu su također prikazani dobiveni rezultati umjeravanja etalonskog mjerila injišta i rosišta s procjenom pripadnih mjernih nesigurnosti.

## 2. Vlažni zrak

Vlažni zrak predstavlja smjesu suhog zraka koji se pojavljuje samo u plinovitom agregatnom stanju i vlage koja može biti u plinovitom, kapljevitom i krutom agregatnom stanju. [2] Tipičan sastav atmosferskog zraka pri temperaturi od 20 °C i relativnoj vlažnosti od 50 % je prikazan na [ Slika 1] . [3]



Slika 1. Tipičan sastav zraka temperature 20°C i relativne vlažnosti 50% [3]

Pri promjenama stanja vlažnog zraka masa suhog zraka  $m_{sz}$  se općenito ne mijenja, dok se masa vodene pare  $m_w$  mijenja zbog kondenzacije, skrućivanja ili ishlapljivanja. Zato je za opisivanje stanja vlažnog zraka moguće koristiti sadržaj vlage  $x$  koji predstavlja broj kilograma vodene pare po kilogramu suhog zraka, a definiran je jednačinom:

$$x = \frac{m_w}{m_{sz}} \quad (1)$$

gdje je:

$x$  - sadržaj vlage [kg<sub>w</sub>/kg<sub>sz</sub>]

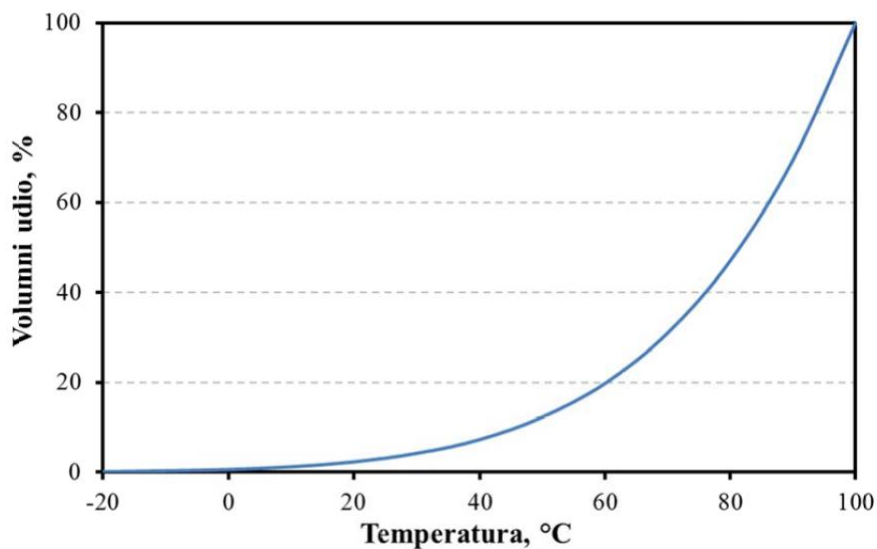
$m_w$  - masa vodene pare [kg<sub>w</sub>]

$m_{sz}$  - masa suhog zraka [kg<sub>sz</sub>]

Sadržaj vlage se kreće u intervalu  $0 \leq x \leq +\infty$ . Ako je  $x = 0$ , tada je  $m_w = 0$ , te se radi samo o suhom zraku, a ako je  $x = \infty$ , tada je  $m_{sz} = 0$ , te se radi samo o kapljevitoj vodi, vodenoj pari



ili ledu. [2] Maksimalna količina vodene pare koju zrak može sadržati ovisna je o temperaturi i tlaku. Ovisnost maksimalne moguće količine vodene pare koju zrak može sadržati pri atmosferskom tlaku prikazana je na [Slika 2]. [4]



Slika 2. Maksimalan volumni udio vodene pare u zraku u ovisnosti o temperaturi [4]

## 2.1. Apsolutna i relativna vlažnost

Apsolutna vlažnost  $\rho_d$  se definira kao omjer mase vodene pare u zraku  $m_w$  i volumena vlažnog zraka  $V$ , a definirana je jednačzbom:

$$\rho_d = \frac{m_w}{V} \quad (2)$$

gdje je:

$\rho_d$ - apsolutna vlažnost [ $\text{kg}_w/\text{m}^3$ ]

$V$ - volumen vlažnog zraka [ $\text{m}^3$ ]

Relativna vlažnost  $\varphi$  se definira kao omjer parcijalnog tlaka vodene pare  $p_d$  pri temperaturi  $\vartheta$  i parcijalnog tlaka zasićenja  $p_s$  pri istoj temperaturi  $\vartheta$ , a definirana je jednačzbom:

$$\varphi = \frac{p_d(\vartheta)}{p_s(\vartheta)} \quad (3)$$

gdje je:

$\varphi$ - relativna vlažnost [-]

$p_d(\vartheta)$ - parcijalni tlak vodene pare pri temperaturi  $\vartheta$  [Pa]

$p_s(\vartheta)$ - parcijalni tlak zasićenja pri temperaturi  $\vartheta$  [Pa]

## 2.2. Parcijalni tlak vodene pare

Prema Daltonovom zakonu, ukupni tlak smjese je jednak zbroju parcijalnih tlakova pojedinih sudionika. Budući da je vlažni zrak smjesa vodene pare i suhog zraka, prema Daltonovom zakonu vrijedi da je ukupni tlak vlažnog zraka, u kojem je vlaga u obliku vodene pare, jednak zbroju parcijalnog tlaka vodene pare  $p_d$  i parcijalnog tlaka suhog zraka  $p_z$ , a definiran je jednadžbom:

$$p = p_z + p_d \quad (4)$$

Sve dok vrijedi da je  $p_d < p_s$ , pri istoj temperaturi  $\vartheta$  vlažnog zraka, vlaga je u zraku sadržana u obliku pregrijane vodene pare, pa se za izračun parcijalnih tlakova vodene pare i suhog zraka može primijeniti jednadžba stanja za idealne plinove. Za slučaj kada su parcijalni tlakovi jednaki za istu temperaturu vlažnog zraka  $p_d = p_s$ , vlaga se javlja u obliku suhozasićene vodene pare, te je to krajnje moguće stanje u kojemu neće doći do izlučivanja vlage u obliku kapljevine ili krutine. Kada su parcijalni tlakovi izjednačeni pri istoj temperaturi vlažnog zraka  $p_d = p_s$ , a temperatura vlažnog zraka je veća od temperature trojne točke vode 0,01 °C, vlaga se u zraku nalazi u obliku suhozasićene vodene pare, dok je ostatak vlage u kapljevitom stanju. Kada su parcijalni tlakovi također izjednačeni pri istoj temperaturi vlažnog zraka  $p_d = p_s$ , a temperatura vlažnog zraka je manja od temperature trojne točke vode 0,01 °C, vlaga se u zraku nalazi u obliku suhozasićene vodene pare, a ostatak se nalazi u obliku leda (krutine). [2]

Kod mjerenja s najvišom razinom točnosti za određivanje tlaka zasićenja vodene pare na osnovi poznatog injišta/rosišta (led/voda) koristi se Sonntagova jednadžba:

$$\ln(e_{zas}) = \sum_{i=0}^3 a_i(T)^{i-1} + a_{ln} \ln(T) \quad (5)$$

gdje je:

$e_{zas}$  - tlak zasićenja vodene pare [Pa]

$T$  - temperatura zraka [°C]

$a_i$  - koeficijenti za Sonntagovu jednadžbu [-]

Postoje dvije grupe koeficijenata  $a_i$ , budući da se tlak zasićenja razlikuje za ravnotežna stanja nad površinom vode i leda, a njihove vrijednosti su prikazane u [Tablica 1] [4]

**Tablica 1. Koeficijenti  $a_i$  za Sonntagovu jednadžbu[3]**

	$e_{zas,voda}$	$e_{zas,led}$
Temp. područje	0 °C do 100 °C	-100 °C do 0 °C
Nesigurnost (k=2)	< 0,01 % vr.	< 1 % vr.
$a_0$	-6096,9385	-6024,5282
$a_1$	21,2409642	29,32707
$a_2$	-2,711193E-02	1,0613868E-02
$a_3$	1,673952E-05	-1,3198825E-05
$a_{ln}$	2,433502	-0,49382577

Ukoliko se u neki sustav u kojem vlada ravnoteža između vodene pare i vode u kapljevitom ili krutom stanju uvede inertni plin (zrak ili dušik), dolazi do blagog povećanja tlaka vodene pare. [3] U zraku sobne temperature i normalnog tlaka zasićenja, povišenje tlaka zasićenja vodene pare iznosi 0,5 %. Stoga je Sonntagovu jednadžbu (5) za izračunavanje tlaka zasićenja potrebno nadopuniti korekcijskim faktorom  $f$ . Korekcijski faktor  $f$  je funkcija apsolutnog tlaka  $p$  i injišta/rosišta zraka  $T_{inj/ros}$ , pa je korigirana jednadžba za izračunavanje tlaka zasićenja dana jednadžbom:

$$e'_{zas} = f(P, T_{inj/ros}) \cdot e_{zas}(T_{inj/ros}) \quad (6)$$

Kod izračunavanja korekcijskog faktora  $f$  u mjeriteljstvu se najčešće upotrebljava Greenspanova jednadžba [1]:

$$f\left(P, T_{\frac{inj}{ros}}\right) = \exp\left[\alpha(T_{inj/ros}) \cdot \left(1 - \frac{e_{zas}(T_{inj/ros})}{P}\right)\right] + \beta(T_{inj/ros}) \cdot \left(\frac{P}{e_{zas}(T_{inj/ros})} - 1\right) \quad (7)$$

$$\alpha(T_{inj/ros}) = \sum_{i=0}^3 A_i \cdot (T_{inj/ros} + 273,15)^i \quad (8)$$

$$\beta(T_{inj/ros}) = \exp\left[\sum_{i=0}^3 B_i \cdot (T_{inj/ros} + 273,15)^i\right] \quad (9)$$

gdje je:

$f$  - faktor povećanja tlaka zasićenja vodene pare u prisutnosti sudioničkih plinova [-]

$P$  - apsolutni tlak zraka [Pa]

$T_{inj/ros}$  - injište/rosište zraka [°C]

Vrijednosti koeficijenata  $A_i$  i  $B_i$  u Greenspanovoj jednadžbi za faktor povećanja tlaka zasićenja vodene pare u prisutnosti sudioničkih plinova su dane u [Tablica 2]:

**Tablica 2. Koeficijenti  $A_i$  i  $B_i$  u Greenspanovoj jednadžbi [4]**

i	Ispod temperature trojne točke vode		Iznad temperature trojne točke vode	
	$A_i$	$B_i$	$A_i$	$B_i$
0	$3,64449 \cdot 10^{-4}$	-10,7271	$3,53624 \cdot 10^{-4}$	-10,7588
1	$2,93631 \cdot 10^{-5}$	$7,61989 \cdot 10^{-2}$	$2,93228 \cdot 10^{-5}$	$6,32529 \cdot 10^{-2}$
2	$4,88635 \cdot 10^{-7}$	$-1,74771 \cdot 10^{-4}$	$2,61474 \cdot 10^{-7}$	$-2,53591 \cdot 10^{-4}$
3	$4,36543 \cdot 10^{-9}$	$2,46721 \cdot 10^{-6}$	$8,57538 \cdot 10^{-9}$	$6,33784 \cdot 10^{-7}$

### 2.3. Injište/Rosište zraka

Prilikom mjerenja svojstava vlažnog zraka od velike važnosti je temperatura pri kojoj vlažni zrak postaje zasićen jer se iz njega pritom počinje izlučivati vlaga u kapljevitom ili krutom obliku. U kojem će se obliku, pri stanju zasićenja, vlaga početi izlučivati ovisi o tome da li je vlažni zrak ohlađen na temperaturu iznad ili ispod temperature trojne točke vode. Ako je temperatura vlažnog zraka iznad temperature trojne točke vode to znači da će se vlaga izlučivati u obliku rose ili kondenzata, a ako je pak temperatura ispod temperature trojne točke vode vlaga će se može početi izlučivati u obliku rose ali i inja ili leda. Ovisno o tome da li se vlaga iz zraka izlučuje u obliku kondenzata/rose ili inja/leda, proizlaze pojmovi rosišta i injišta.

Rosište  $T_{ros}$  je temperatura do koje je potrebno hladiti vlažni zrak, pri konstantnom tlaku, kako bi došlo do pojave rose, odnosno kondenzacije vodene pare. Ta se temperatura može postići ako pri nepromijenjenoj količini vodene pare zrak hladimo do zasićenja. Rosište je ravnotežno stanje u kojemu je parcijalni tlak vodene pare u zraku jednak ravnotežnom tlaku. [5]

Injište  $T_{inj}$  je temperatura pri kojoj, prilikom hlađenja zraka, dolazi do pojave inja odnosno leda. To je temperatura pri kojoj je zrak zasićen vodenom parom u ravnoteži s ledom. [3]

Povišenje relativne vlažnosti zraka, pri konstantnom sadržaju vodene pare, upućuje na približavanje temperature zraka njegovom rosištu odnosno injištu. Pri relativnoj vlažnosti 100 %, rosište je jednako temperaturi zraka, te je on maksimalno zasićen vodenom parom. [5]

### 2.4. Mjerenje vlažnosti zraka

Mjerenje relativne vlažnosti ima važnu ulogu u mnogim procesima u industriji, budući da se mjerenjima vlažnosti može spriječiti kondenzacija, korozija, deformacija ili kvarenje proizvoda, što je iznimno važno za prehrambenu industriju, farmaceutsku industriju, drvnu industriju i dr. Zaslužno je za održavanje optimalnih uvjeta i minimalnog utroška energije, što je posebno bitno u agronomiji i meteorologiji. Reguliranje vlažnosti je često prisutno i u klimatizacijskim sustavima, budući da se znatna količina energije troši na hlađenje zraka kako bi se iz njega uklonila vodena para. [6]

Postoji mnogo različitih metoda i načina za mjerenje relativne vlažnosti zraka, a koju ćemo metodu primijeniti ovisi o potrebama mjerenja i željenoj razini točnosti rezultata. Metode mjerenja vlažnosti se dijele na direktne i posredne.

Direktne metode mjerenja vlažnosti plina omogućuju direktno određivanje veličina stanja. Odnose se na količinu vodene pare u plinu, a pomoću njih je moguće odrediti mnoge veličine za mjerenje vlažnosti kao npr. maseni omjer, maseni udio odnosno specifičnu vlažnost, apsolutnu vlažnost, volumni udio, molni udio, parcijalni tlak vodene pare, rosište, injište i dr. Za direktno mjerenje vlažnosti mogu se koristiti:

- Gravitacijske metode
- Psihrometri
- Higrometri točke rose

Gravitacijska metoda uključuje fizičko odvajanje vodene pare od plina nosioca. Takvim instrumentima precizno se mjeri volumen vlažnog plina koji kroz njih prolazi, vodena para se odvaja od plina nosioca te se na posljertku masa vodene pare u plinu određuje preciznim vaganjem. Iz dobivenog omjera mase vodene pare i volumena vlažnog plina (apsolutna vlažnost) moguće je izračunati i ostale higrometrijske parametre. Gravitacijska metoda se smatra najtočnijom metodom za mjerenje vlažnosti plinova. Njene najveće mane su vrlo skupa izvedba mjerne linije, komplicirana upotreba i dugotrajna mjerenja, zbog čega ih je jako malo u svijetu.

Psihrometri su instrumenti koji se sastoje od dva termometra, od kojih je jedan suh a drugi se ovlažuje. Na temelju temperatura suhog i vlažnog termometra se određuje relativna vlažnost zraka, za što se, kod starijih psihrometara, koriste tablice, dijagrami ili jednadžbe, dok moderniji psihrometri sami izračunavaju i direktno prikazuju relativnu vlažnost. Koriste se za mjerenje relativne vlažnosti u mjernom području od 5 % do 100 % relativne vlažnosti, pri temperaturama od 0 °C do 100 °C. Specijalne izvedbe psihrometara mogu raditi i u širem temperaturnom području. Kako bi mjerenja bila uspješno obavljena potrebna je relativno velika količina zraka.

Higrometri točke rose mjere rosište/injište zraka njegovim hlađenjem do pojave kondenzata ili leda. Uređaj se sastoji od termometra, ogledala, hladila, izvora svjetlosti i fotodetektora. Rade na principu da uzorak zraka struji preko polirane površine metala kojemu se temperatura precizno regulira i mjeri pomoću Peltier-ovog elementa, preciznog termometra i regulatora. Pomoću fotodetektora se detektira pojava kondenzata ili leda na poliranoj površini metala, budući da se pritom smanjuje intenzitet svjetlosti reflektirane s njegove površine. Za održavanje konstantne

debljine sloja kondenzata/leda na poliranoj metalnoj površini, zaslužna je precizna regulacijska elektronika. Ovi instrumenti rade u mjernom području od  $-100\text{ °C}$  do  $100\text{ °C}$ , pri čemu se mogu postići male mjerne nesigurnosti, čak i do  $0,03\text{ °C}$ . Zbog relativno velike dugoročne stabilnosti i malih nesigurnosti često se koriste kao etaloni za umjeravanje drugih tipova higrometara.

Posredne metode mjerenja vlažnosti omogućuju praćenje promjena osobine neke tvari, koja je funkcionalno vezana uz promjenu vlažnosti. Najčešći tipovi instrumenata za posredno mjerenje vlažnosti zraka su:

- Higrometri s elastičnim elementima
- Otpornički higrometri
- Dielektrični (kapacitivni) higrometri

Higrometri s elastičnim elementima se sastoje od niti organskog porijekla (konjska dlaka, papir i sl.) i opruge, a mogu biti opremljeni i pitalom. Povećanjem vlažnosti zraka duljina niti, koja mu je izložena te je napregnuta oprugom, se povećava. Ovaj pomak prenosi se mehanizmom na kazaljku ili pisalo instrumenta. Higrometri s elastičnim elementima se koriste za mjerenje relativne vlažnosti zraka pri sobnim temperaturama, u mjernom području od  $20\%$  do  $80\%$ . Organska nit mora biti u potpunosti izložena zraku čiju vlažnost mjerimo. Relativno su jeftini, a nedostaci su im histereza, spor odziv i moguća trajna oštećenja kod potpunog ovlaživanja ili isušivanja.

Osjetnicima otporničkih higrometara mijenja se električni otpor u ovisnosti o relativnoj vlažnosti i temperaturi zraka kojem su izloženi. Koriste se za mjerenje relativne vlažnosti u mjernom području od  $5\%$  do  $95\%$ , pri temperaturama od  $-30\text{ °C}$  do  $60\text{ °C}$ . Postoje i specijalne izvedbe koje je moguće koristiti pri temperaturama od  $-50\text{ °C}$  do  $200\text{ °C}$ . Nedostaci ovih instrumenata su histereza, osjetljivost na onečišćenja i ogrebotine i velika ovisnost karakteristike o temperaturi.

Dielektrični higrometri kao osjetnik relativne vlažnosti imaju elektroničku komponentu kojoj se pri apsorpciji/desorpciji vodene pare iz zraka mijenja električni kapacitet. Dielektrični higrometri se koriste za mjerenje relativne vlažnosti u mjernom području od  $5\%$  do  $100\%$ , pri temperaturama od  $-30\text{ °C}$  do  $60\text{ °C}$ . Posebnim izvedbama ovih instrumenata relativnu vlažnost zraka je moguće mjeriti i u širem rasponu temperatura od  $-40\text{ °C}$  do  $200\text{ °C}$ . Nedostaci dielektričnih higrometara relativne vlažnosti su histereza i problemi koji se javljaju pri izradi vrlo tankog higroskopskog dielektrika. Postoje i dielektrični higrometri apsolutne vlažnosti, koji rade u mjernom području od  $-100\text{ °C}$  (injište) do  $120\text{ °C}$  (rosište). Prednost dielektričnih higrometara apsolutne vlažnosti su

širok mjerni raspon, uključujući i suhe plinove, dok su nedostaci spor odziv, dugo vrijeme stabilizacije, drift, histereza i problemi s izradom. [3]



### 3. PRIMARNI GENERATORI ZRAKA POZNATOG INJIŠTA/ROSIŠTA

#### 3.1. Uvod

Osnovna komponenta svakog generatora vlažnosti je saturator. Saturator mora biti konstruiran tako da u potpunosti zasiti ispitni plin koji kroz njega prolazi. U tom slučaju slijedi da se injište/rosište zraka u saturatoru  $t_s$  može precizno odrediti mjerenjem temperature zraka u saturatoru.

Količinski udio vodene pare u saturatoru ovisi o temperaturi i tlaku u saturatoru:

$$x_{ws} = \frac{f(p_s, t_s)p_w(t_s)}{p_s} \quad (10)$$

gdje je:

$p_w(t_s)$  - tlak zasićenja čiste vodene pare na temperaturi saturatora [Pa]

$f(p_s, t_s)$  - faktor povećanja tlaka zasićenja vodene pare u prisutnosti sudioničkih plinova, određen pri temperaturi i tlaku zraka u saturatoru [-]

$t_s$  - temperatura zraka u saturatoru [°C]

$p_s$  – tlak zraka u saturatoru [Pa]

$x_{ws}$  - količinski udio vodene pare u saturatoru [-]

Na izlazu iz saturatora, količinski udio vodene pare ovisi o izlaznoj temperaturi i tlaku:

$$x_{wd} = \frac{f(p_d, t_d)p_w(t_d)}{p_d} \quad (11)$$

gdje je:

$p_w(t_d)$  – tlak zasićenja čiste vodene pare pri temperaturi injišta/rosišta zraka na mjestu mjerenja (u neposrednoj blizini osjetnika umjeravanog higrometra) [Pa]

$f(p_d, t_d)$  - faktor povećanja tlaka zasićenja vodene pare u prisutnosti sudioničkih plinova, određen pri temperaturi injišta/rošišta i tlaku zraka na mjestu mjerenja (u neposrednoj blizini osjetnika umjeravanog higrometra) [-]

$t_d$  - injište/rošišta zraka u neposrednoj blizini osjetnika umjeravanog instrumenta [°C]

$p_d$  - tlak zraka u neposrednoj blizini osjetnika umjeravanog instrumenta [Pa]

$x_{wd}$  - količinski udio vodene pare u neposrednoj blizini osjetnika umjeravanog instrumenta [-]

Ako pretpostavimo da molekule zraka nisu apsorbirane na stijenkama cijevi ili drugim prostorima na putu od saturatora do osjetnika umjeravanog higrometra točke rose, količinski udio vodene pare ostaje nepromijenjen:

$$x_{ws} = x_{wd} \quad (12)$$

$$f(p_d, t_d)p_w(t_d) = \frac{p_d}{p_s} f(p_s, t_s)p_w(t_s) \quad (13)$$

Gornja jednačba (13) pokazuje da je injište/rošišta zraka koji prolazi kroz osjetnik umjeravanog higrometra različito od injišta/rošišta zraka zasićenog u saturatoru. Za određivanje referentnog injišta/rošišta zraka koji prolazi kroz osjetnik umjeravanog instrumenta potrebno je precizno mjerenje:

-temperature zraka u saturatoru,  $t_s$

-tlaka zraka u saturatoru,  $p_s$

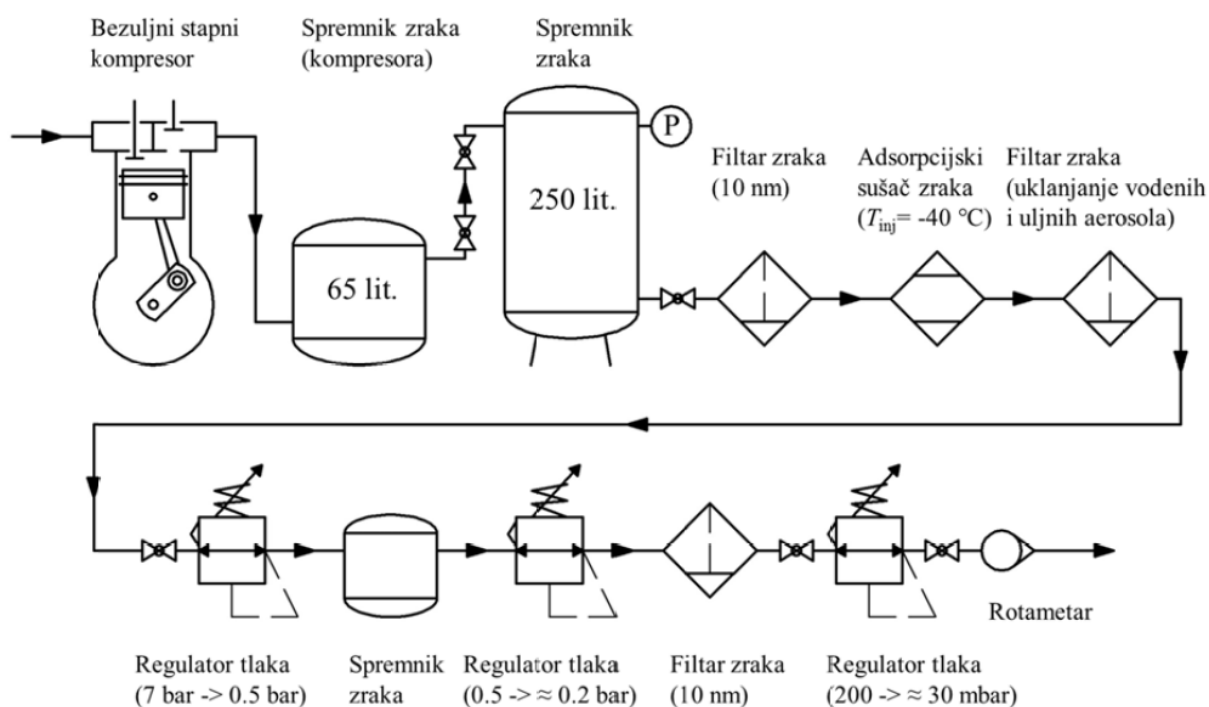
-tlaka zraka u neposrednoj blizini osjetnika umjeravanog higrometra,  $p_d$ . [7]

### 3.2. Princip rada generatora vlažnosti u LPM-u

U Laboratoriju za procesna mjerenja se nalaze niskotemperaturni i visokotemperaturni generator zraka poznatog injišta/rošišta. Oba generatora koriste saturatore s jednim tlakom i jednim prolazom, tj. uzorak plina prolazi kroz saturator samo jednom, a njegova točka injišta/rošišta se kontrolira samo temperaturom saturatora. Kod oba generatora su saturatori u potpunosti potopljeni

u radne medije termometrijskih kupki. Kako bi se smanjila adsorpcija i desorpcija vodene pare na unutrašnjim stijenkama cijevi i komore koji čine saturator, a kroz koje struji plin koji se zasićuje, one su izrađene od nehrđajućeg čelika, te su elektropolirane s unutarnje strane. Jedina su iznimka cijevi izmjenjivača topline koje imaju hrapaviju površinu, što poboljšava izmjenu topline i time kondenzaciju.

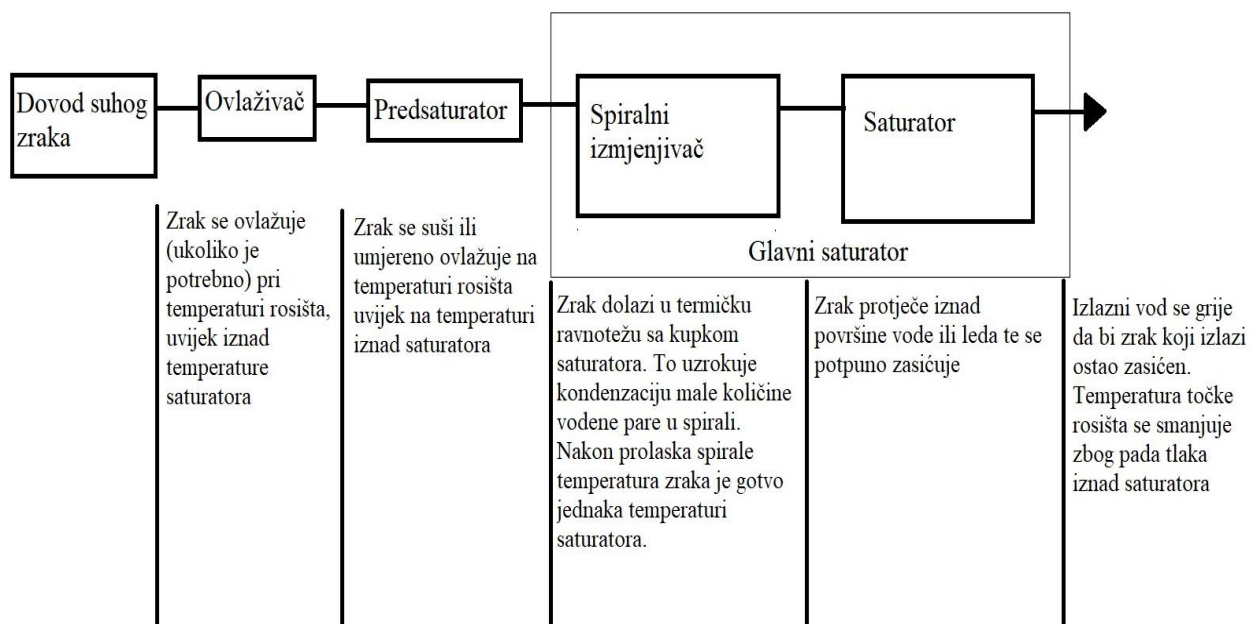
Saturatori su konstruirani za rad sa zrakom, iako se mogu koristiti i za druge plinove. Kako bi se omogućio ispravan rad saturatora i spriječilo njegovo onečišćenje, potrebno je pravilno pripremiti zrak koji se u njemu zasićuje. Prvo se zrak komprimira u bezuljnom stapnom kompresoru. Zbog pojave oscilacija tlaka uslijed punjenja i pražnjenja spremnika zraka u kompresoru, nakon kompresora se postavlja dodatni veći spremnik kako bi se te oscilacije smanjile. Zrak se zatim suši u adsorpcijskom sušaču i filtrira. Na ovaj način se u saturatore doprema suhi zrak bez čestica većih od 10 nm, tlaka 0,7 MPa i približnog injišta od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Na [Slika 3] je prikazana shema pripreme čistog zraka, a u radu je kasnije detaljno opisan postupak pripreme zraka i svih njegovih komponenti.



Slika 3. Shema pripreme čistog zraka [4]

Na izlazu iz sustava za pripremu, protok zraka se pomoću dvije paralelne cijevi dijeli u dvije struje kojima se napajaju niskotemperaturni i visokotemperaturni generator. Protok kroz saturatore

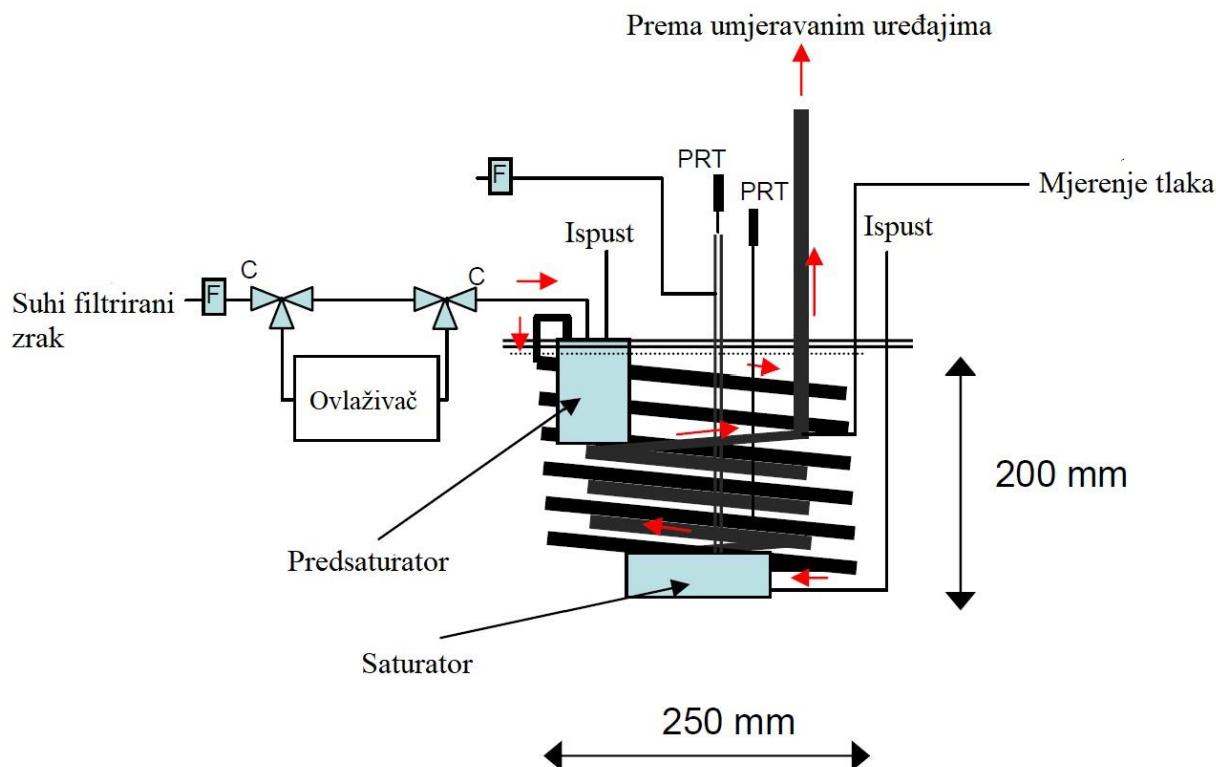
regulira se pomoću preciznih regulatora. Prije upotrebe saturatori se pune deioniziranom vodom visoke čistoće. Niskotemperaturni saturator je konstruiran za rad pri protocima od 1,0 L/min do 2,5 L/min, a visokotemperaturni saturatori za rad od 2,0 L/min do 2,6 L/min. [8] Na [Slika 4] je prikazana shema termodinamičkog procesa u saturatorima.



Slika 4. Shema termodinamičkog procesa saturatora [7]

### 3.3. Niskotemperaturni saturator (LRS)

Niskotemperaturni saturator konstruiran je za rad u temperaturnom području od  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pri protocima zraka od 1,0 L/min do 2,5 L/min. Na [Slika 5] je prikazana shema niskotemperaturnog saturatora s označenim dijelovima i okvirnim dimenzijama.



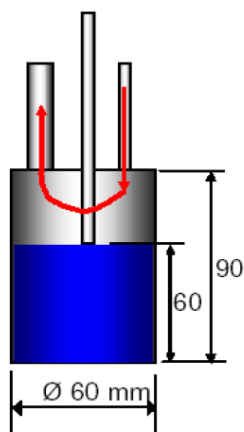
Slika 5. Shema niskotemperaturnog saturatora LRS [7]

Najprije se zrak ovlaži do temperature zasićenja koja je malo viša od temperature saturatora (odnosno tekućine u termometrijskoj kupki). Zatim se zrak suši prolazeći kroz spiralni izmjenjivač topline. Potpuno zasićenje zraka se osigurava dovođenjem zraka u izravni kontakt s vodom ili ledom na dnu saturatora. Zrak zatim struji kroz izlazni spiralni izmjenjivač topline koji smanjuje rizik od naknadne kondenzacije vodene pare u izlaznoj cijevi.

Temperatura zasićenja u saturatoru se mjeri pomoću tri etalonska platinska otpornička osjetnika temperature. Jedan od njih je smješten unutar komore saturatora, te je u direktnom kontaktu s vodom ili ledom, dok su preostala dva uronjena u alkoholnu kupku.

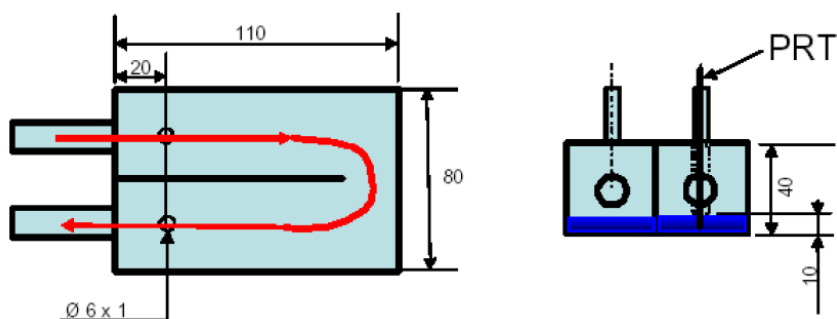
Ovlaživač se sastoji od by-pass cijevi i posude punjene vodom s ON/OFF ventilom. Kada je potrebno ovlaživanje zraka (tj. kada je temperatura saturatora blizu gornje granice radnog područja), ventil se otvara i dio zraka ulazi kroz posudu punjenu vodom, pritom se ovlažuje, te se miješa se sa suhim zrakom iz by-passa. Ovime se smanjuje opterećenje predsaturatora i osigurava sigurno zasićivanje zraka vodenom parom.

Spiralni izmjenjivač topline je izrađen od cijevi od nehrđajućeg čelika promjera 12 mm. Svi spojevi cijevi ostvareni su Swagelok spojnica koje osiguravaju adekvatno brtvljenje sustava.



Slika 6. Skica predsaturatora LRS-a [6]

Na [Slika 6] je prikazana skica LRS predsaturatora. Predsaturator je jednostavna cilindrična posuda koja je djelomično uronjena u radnu kapljevину termometrijske kupke. Cijevi za ulaz i izlaz zraka se nalaze na vrhu posude. Led ili voda samo djelomično ispunjava predsaturator. Kada je temperatura saturatora iznad 0 °C, razinu vode moguće je korigirati trećom cjevčicom, koja je na skici prikazana na sredini predsaturatora.

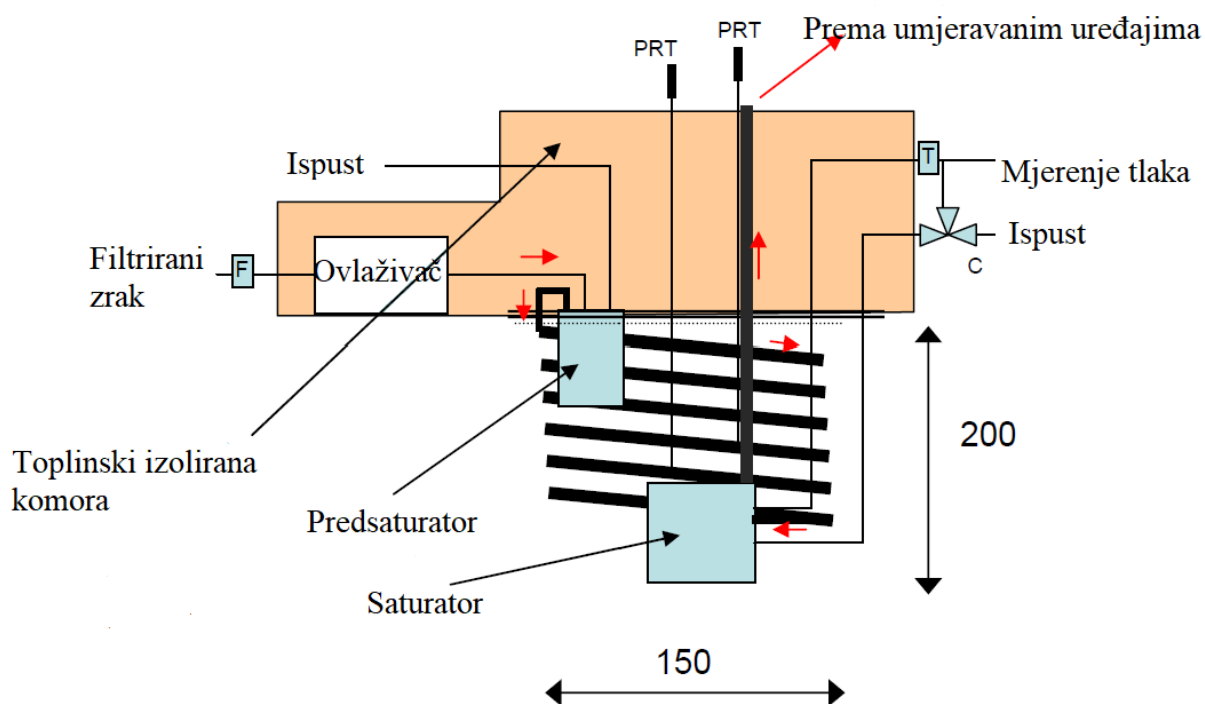


Slika 7. Shema LRS komore saturatora [7]

Na [Slika 7] je prikazana komora saturatora. Komora saturatora je horizontalno postavljena posuda pravokutnog poprečnog presjeka u kojoj voda ili led prekriva dno. Razinu vode ili leda u komori saturatora moguće je korigirati na isti način kao i u predsaturatoru. Za vrijeme upotrebe saturatora na cijev za korekciju razine vode priključen je barometar kojim se precizno mjeri tlak zraka u komori saturatora. Postoji još jedna ravna cijev u komori kroz koju se u saturator postavlja tanki platinski otpornički osjetnik temperature koji služi za mjerenje temperature vode ili leda u komori. [7]

### 3.5. Visokotemperaturni saturator (HRS)

Viskotemperaturni saturator konstruiran je za rad u temperaturnom području od 1 °C do 60 °C, pri protocima zraka od 2,0 L/min do 2,6 L/min. Na [Slika 8] je prikazana shema viskotemperaturnog saturatora s označenim dijelovima i okvirnim dimenzijama.



Slika 8. Shema viskotemperaturnog saturatora HRS [7]

Budući da se saturator koristi za rad s rosištima koja su viša od okolišnje temperature, sve cijevi izvan kupke moraju biti dodatno grijane i toplinski izolirane. Za određivanje temperature saturatora koriste se dva etalonska platinska otpornička osjetnika temperature koji su uronjeni u kupku, u neposrednoj blizini saturatora. Temperatura unutar grijanog kućišta saturatora se kontrolira pomoću sustava grijanja koji se sastoji od ventilatora, grijača, termometra i regulatora. Termometri koji se koriste za mjerenje temperature saturatora umetnuti su u kupku kroz provrte u poklopcu kućišta saturatora. [7]

Filtrirani zrak se najprije ovlažuje na temperaturu koja je 20-tak stupnjeva viša od željenog rosišta. To se ostvaruje prolaskom zraka kroz ovlaživač koji je izveden kao posuda djelomično napunjena vodom, a nalazi se unutar grijanog kućišta. Nakon izlaska iz ovlaživača, zrak ulazi u predsaturator gdje se suši do temperature rosišta, koja je gotovo jednaka temperaturi saturatora.

Visokotemperaturni saturator je vrlo sličan niskotemperaturnom saturatoru, ali se razlikuju po tome što je visokotemperaturni predsaturator u potpunosti potopljen u kapljevitu kupku, te mu je razina vode niža nego kod niskotemperaturnog predsaturatora. Razlog tome je što visokotemperaturni saturator prvenstveno uklanja višak vode, dok niskotemperaturni prvenstveno ovlažuje zrak.

U spiralnom izmjenjivaču topline dolazi do kondenzacije male količine vodene pare kada se zrak dovodi u toplinsku ravnotežu s vodom u kupki. Nakon što zrak prođe kroz spiralni izmjenjivač topline, rosište zraka je otprilike jednako temperaturi saturatora.

Potpuno zasićenje je osigurano prolaskom zraka preko vodene površinom u komori saturatora. Komora saturatora je horizontalna posuda koja je konstrukcijski slična komori niskotemperaturnog saturatora. Put koji zrak pređe u saturatoru je otprilike 200 mm. Komora saturatora je opremljena s dvije vertikalne cijevi. Jedna cijev je namijenjena za kontrolu razine vode u saturatoru, dok druga omogućuje mjerenje tlaka zraka unutar saturatora.

Ovlaženi zrak iz komore saturatora izlazi kroz vertikalnu izlaznu cijev. Izlazna cijev se treba grijati kako bi se spriječila kondenzacija zasićenog zraka.

Za određivanje temperature u saturatoru koriste se dva termometra a kao referentna temperatura uzima se prosječna vrijednost njihovih očitavanja. Oba termometra su u kupku postavljena kroz provrte na grijanom kućištu saturatora. [1]



## 4. POSTUPAK UMJERAVANJA MJERILA INJIŠTA I ROSIŠTA ZRAKA

### 4.1. Uvod

Fizički umjeravanje počinje tek kada se zaprimi umjeravani instrument. Obrasci koji se koriste pri postupku umjeravanja instrumenata su standardizirani i nisu tema ovoga rada. Zatim slijedi ispunjavanje tih obrazaca, u koje se upisuju osnovni podaci o umjeravanom instrumentu, etalonskim instrumentima i ostaloj opremi koja se koristi za provedbu umjeravanja. Na računalu se kreiraju i datoteke u kojima će se bilježiti podaci vezani uz umjeravanje.

### 4.2. Matematičke osnove

Faktor pojačanja  $f$  je funkcija tlaka  $P$  i temperature  $t$ , a definiran je jednačbom:

$$f(t, P) = \frac{P_v}{e(t)} \quad (14)$$

gdje je:

$f$  - faktor povećanja tlaka [-]

$P_v$  - parcijalni tlak vodene pare u vlažnom zraku [Pa]

$e$  - tlak zasićenja vodene pare nad površinom vode ili leda [Pa]

Parcijalni tlak  $P_v$  vodene pare u vlažnom zraku pri temperaturi  $t$  je veći od tlaka zasićenja  $e(t)$  tekućine ili krutine pri temperaturi  $t$ .

Relativna vlažnost blizu osjetnika koji se umjerava je definirana jednačbom:

$$h = \frac{x_o P_o}{f(t_o P_o) e(t_o)} \cdot 100\% \quad (15)$$

gdje je:

$h$  - relativna vlažnost [%]

$x_o$  - molni udio pare [kg/kg]

$P_o$  - tlak blizu osjetnika [Pa]

$t_o$  - temperatura zraka [°C]

Molni udio pare  $x_o$  se izračunava iz mjerenja temperature  $t_s$  i tlaka  $P_s$  zraka u saturacijskoj komori:

$$x_o = \frac{f(t_s, P_s)e(t_s)}{P_s} \quad (16)$$

gdje je:

$P_s$  - tlak vlažnog zraka u saturacijskoj komori [Pa]

$t_s$  - temperatura zasićenja [°C]

$e$  - tlak zasićenja vodene pare nad površinom vode ili leda u saturacijskoj komori [Pa]

Ista jednadžba kao (16) se može koristiti za umjeravanje mjerila relativne vlažnosti zraka pomoću injišta/rosišta i temperature zraka  $t_o$ , pri čemu je  $t_s$  izmjereno rosište, a  $P_s$  tlak zraka u neposrednoj blizini osjetnika.

Uvrštavanjem jednadžbe za molni udio pare (16) u jednadžbu za relativnu vlažnost (15), jednadžba za relativnu vlažnost poprima oblik:

$$h = \frac{f(t_s P_s)e(t_s)}{f(t_o P_o)e(t_o)} \cdot \frac{P_o}{P_s} \cdot 100\% \quad (17)$$

Ako se radi o rezultatu pri konstantnom tlaku, vrijednosti tlakova  $P_s$  i  $P_o$  su slične, što rezultira sličnim vrijednostima faktora povećanja koji se stoga mogu izostaviti:

$$h \approx \frac{e(t_s)}{e(t_o)} \cdot 100\% \quad (18)$$

Za izračun različitih parcijalnih tlaka vodene pare u zraku mogu se koristiti sljedeće jednadžbe:

- Tlak zasićene pare u čistoj fazi u odnosu na vodu (Sonntagova formulacija):

$$e_w(t) = (6096,9385 \cdot (273,15 + t)^{-1} + 16,635794 - 2,711193 \cdot 10^{-2} \cdot (273,15 + t) + 1,673952 \cdot 10^{-5} \cdot (273,15 + t)^2 + 2,433502 \cdot \ln(273,15 + t)) \quad (19)$$

Ova jednadžba (19) vrijedi za temperaturno područje od -100 °C do +100 °C.

- Budući da je zrak mješavina različitih plinova, tlak zasićenja pare je potrebno pomnožiti faktorom povećanja (Bögel-ova formula):

$$f_w(p, t) = 1 + \frac{10^{-4} \cdot e_w(t)}{273,15 + t} \cdot \left( \left( 38 + 173 \cdot e^{-\frac{t}{43}} \right) \cdot \left( 1 - \frac{e_w(t)}{p} \right) + (6,39 + 4,28 \cdot e^{-t/107}) \cdot \left( \frac{p}{e_w(t)} - 1 \right) \right) \quad (20)$$

gdje je:

$p$  - ispitni tlak [Pa]

$t$  - ispitna temperatura [°C]

Uzimajući u obzir faktor povećanja, parcijalni tlak vodene pare u vlažnom zraku pri temperaturi zasićenja i tlaku zasićenja je jednak:

$$e' = f_w(p_s, t_d) \cdot e_w(t_d) \quad (21)$$

Tlak zasićenja vodene pare pri ispitnoj temperaturi i ispitnom tlaku je dan izrazom:

$$e'_w(t) = f_w(p, t) \cdot e_w(t) \quad (22)$$

Relativna vlažnost se izračunava pomoću gore navedenih izraza za izračunavanje tlaka zasićenja (21) i (22) :

$$h = \frac{e'}{e'_w} \cdot 100\% \quad (23)$$

### 4.3. Vizualna kontrola ispitivanog uređaja

Po primitku umjeravanog instrumenta potrebno je najprije vizualnim pregledom ustanoviti njegovu ispravnost kao mjeru predostrožnosti. Ako se ustanove bilo kakva oštećenja potrebno je obavijestiti vlasnika instrumenta. Prije početka i tijekom umjeravanja potrebno je osigurati praćenje uvjeta okoline, odnosno temperature i vlažnosti zraka u prostoriji u kojoj se umjeravanje provodi. Dozvoljeni raspon temperatura okoliša za vrijeme umjeravanja je  $23 \pm 3$  °C dok se relativna vlažnost zraka u prostoriji može kretati u granicama između 25 % i 75 %.

### 4.4. Točke umjeravanja

Umjeravanje se provodi u najmanje tri umjerne točke, počevši od najnižeg rosišta prema najvišem, čime je potrebno obuhvatiti mjerni raspon u kojem se instrument upotrebljava. Broj točaka umjeravanja može biti proširen dodatnim točkama koje su jednoliko raspoređene unutar mjernog raspona u kojem se instrument nakon umjeravanja planira koristiti.

### 4.5. Proces umjeravanja

Prije početka procesa umjeravanja, umjeravani instrument mora najmanje 12 sati provesti u prostoriji u kojoj će se obaviti umjeravanje i čija je okolišna temperatura u granicama  $23 \pm 3$ °C. [8]

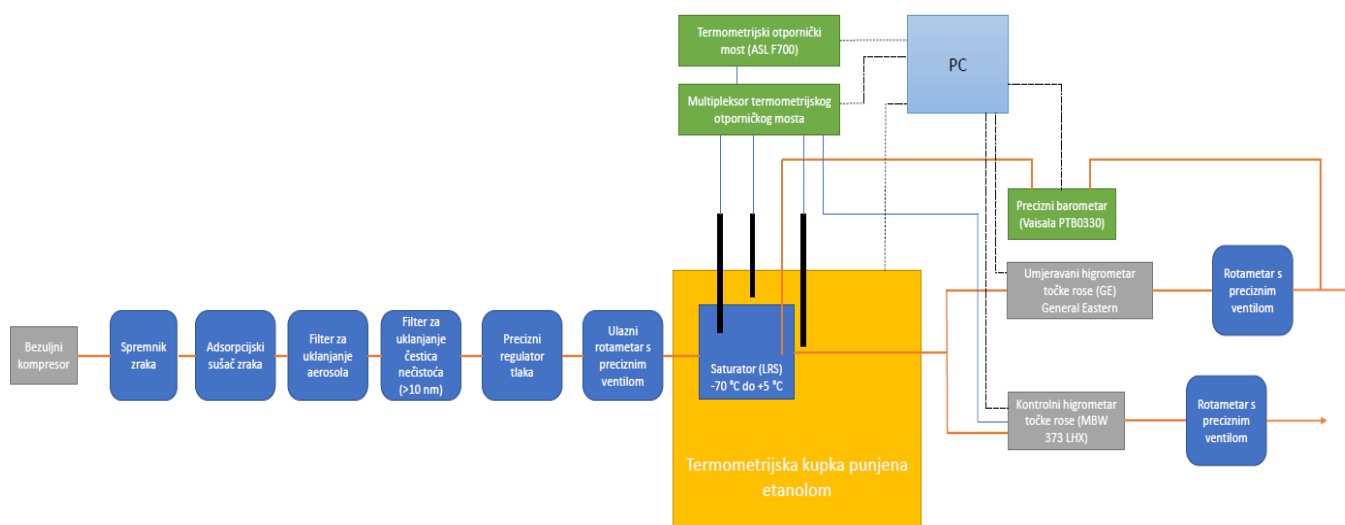
Umjeravanje se provodi sljedećim operacijama:

1. Paljenje temperaturne kupke u kojoj se nalazi saturator i podešavanje željenog referentnog injišta/rosišta
2. Paljenje regulatora temperature grijanih cijevi i spojeva i podešavanje na temperaturu koja je 20 °C iznad rosišta koje se želi ostvariti (samo za HRS)

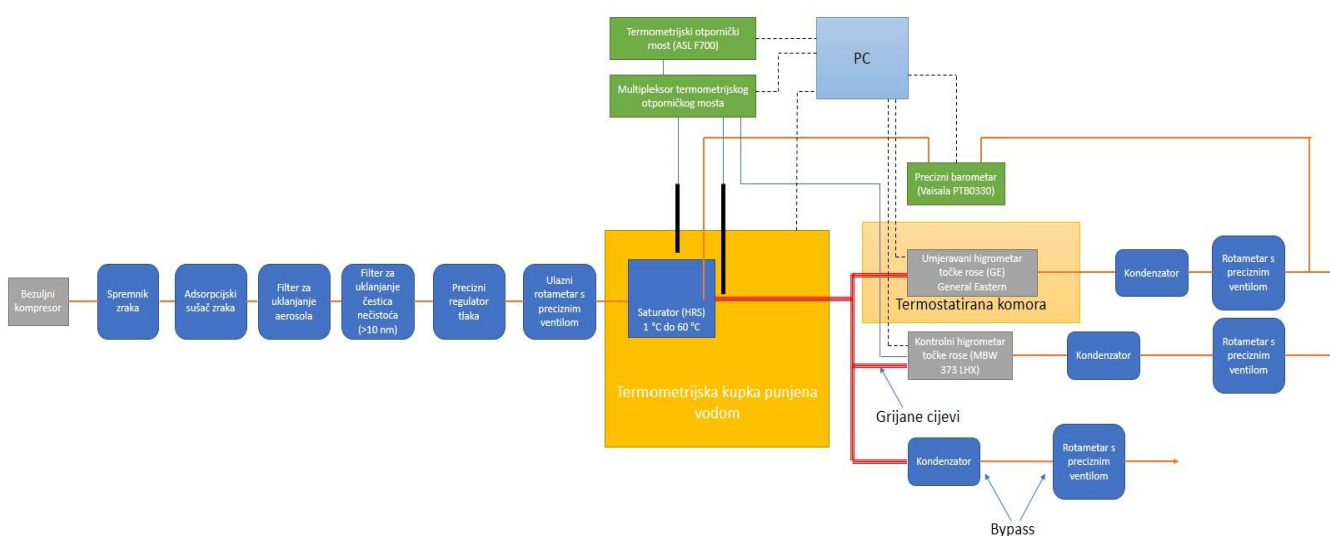
3. Provjera propusnosti sustava praćenjem protoka zraka na ulaznom rotametu dok su svi izlazni ventili zatvoreni, pri pretlaku zraka od cca. 30-60 mbar (protok mora biti 0 L/min)
4. Nakon što kupka i grijači cijevi i spojeva dostignu zadane temperature, podešavaju se željeni protoci zraka kroz umjeravani i kontrolni higrometar te bypass (ako je potrebno), tijekom provedbe umjeravanja opisanog u ovom radu protok kroz oba higrometra podešen je na 0.5 L/min.
5. Pokreće se mjerenje injišta/rošišta zraka na umjeravanom i kontrolnom higrometru
6. Uključuju se računalni programi za bilježenje i pohranjivanje očitavanja: etalonskih termometara i termometra ugrađenog u ogledalo kontrolnog higrometra točke rose, barometra, umjeravanog higrometra i kontrolnog higrometra.
7. Na računalu se prate očitavanja svih instrumenata do njihove stabilizacije, kad više nema sustavnih promjena izmjerenih vrijednosti
8. Nakon što se stabiliziraju, očitavanja svih instrumenata bilježe se najmanje narednih 45 minuta s intervalom od najviše jedne minute
9. Ukoliko je u posljednjih 45 minuta stabilnost očitavanja svih instrumenata zadovoljavajuća, mjerenje se smatra završenim te se na računalu pohranjuju svi podaci prikupljeni s relevantnih mjernih instrumenata
10. Zaustavlja se protok zraka pomoću izlaznih rotametara te se provodi provjera propusnosti sustava. Sustav se smatra zabrtvljenim ukoliko ulazni rotametar pokazuje protok zraka od 0 L/min (pretlak se kreće u granicama od 30 do 60 mbar)
11. Temperatura kupke i grijača spojeva podešavaju se za sljedeću umjernu točku ili se sva oprema gasi do sljedećeg radnog dana

## 5. MJERNI SUSTAV

Na [Slika 9] i [Slika 10] su prikazane sheme mjernih linija koje su se koristile za predmetno umjeravanje. Mjerne linije su sastavljene koristeći postojeće uređaje i pomoćnu opremu koja je na raspolaganju u FSB-LPM-u. U nastavku rada svi korišteni instrumenti i oprema su detaljno opisani.



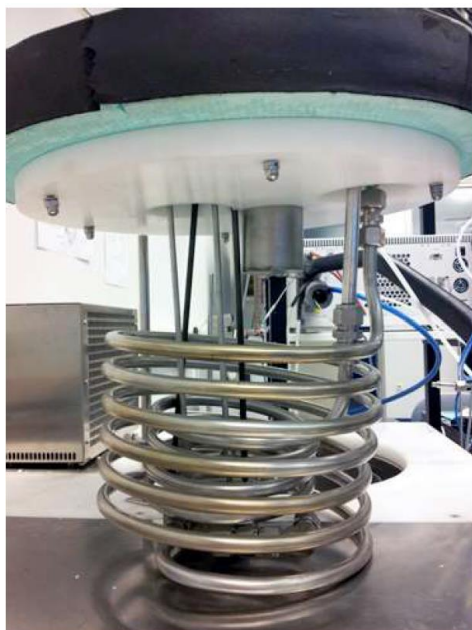
Slika 9. Shema mjerne linije za temperaturno područje od  $-25\text{ °C}$  do  $1\text{ °C}$



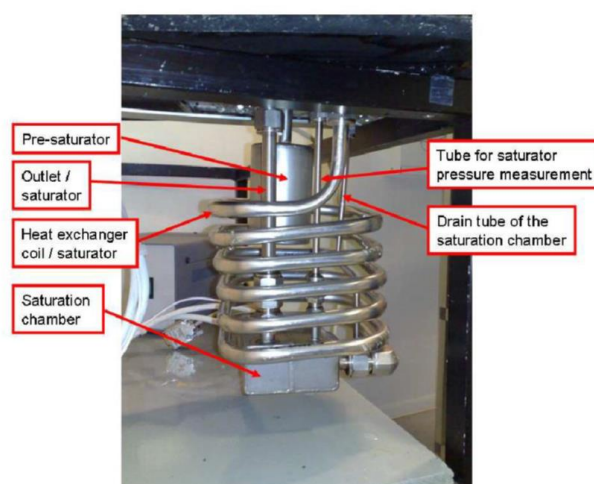
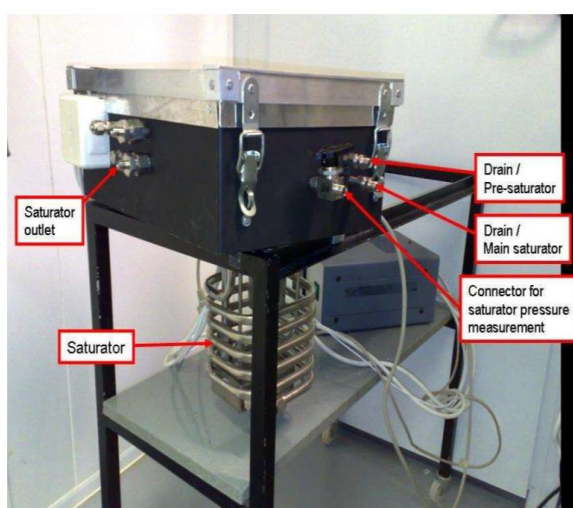
Slika 10. Shema mjerne linije za temperaturno područje od  $10\text{ °C}$  do  $60\text{ °C}$

## 5.1. Saturatori zraka

Na [Slika 11] je prikazan niskotemperaturni saturator (dio primarnog generatora) koji se koristi za rad u temperaturnom području od  $-70\text{ °C}$  do  $5\text{ °C}$ . Na [Slika 12] je prikazan visokotemperaturni saturator (dio primarnog generatora) koji se koristi za rad u temperaturnom području od  $1\text{ °C}$  do  $60\text{ °C}$ . Oba saturatora, te njihov princip rada su detaljno opisani u Poglavlju 3.



Slika 11. Niskotemperaturni saturator [3]



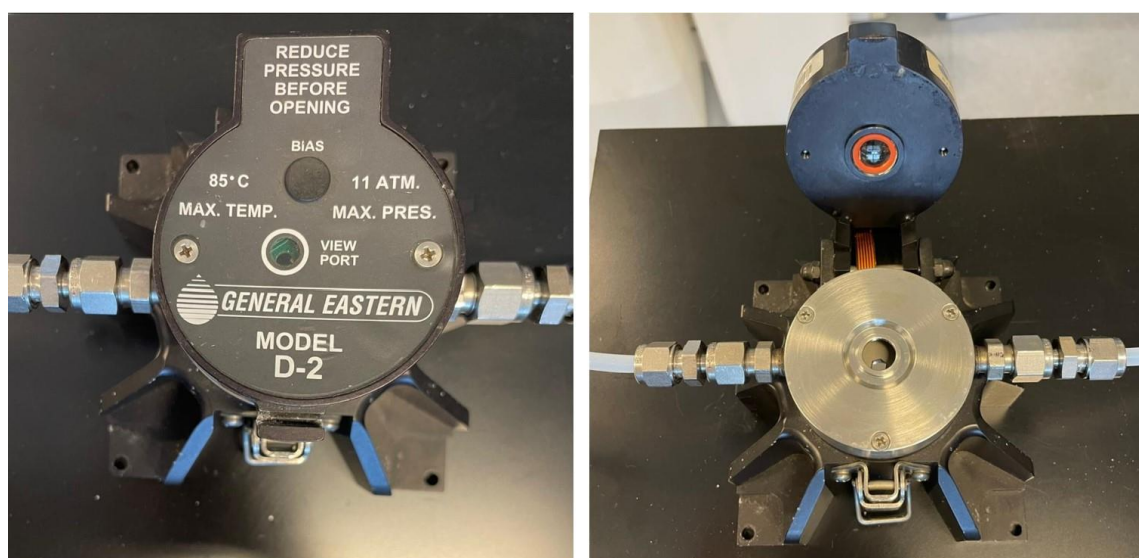
Slika 12. Visokotemperaturni saturator [3]

## 5.2. Umjeravani higrometar točke rose

U ovom radu umjeravan je higrometar točke rose proizvođača General Eastern. Higrometar se sastoji od pokazne jedinice modela Hygro-M2 [Slika 13], osjetnika injišta/rosišta modela D-2 [Slika 14] i platinskog otporničkog osjetnika temperature. Ovaj higrometar mjeri temperaturu zraka i injište/rosište, te pomoću tih podataka izračunava postotak relativne vlažnosti zraka. Može se upotrebljavati za širok raspon vrijednosti injišta/rosišta.



Slika 13. Pokazni uređaj General Eastern M2



Slika 14. Osjetnik injišta/rosišta General Eastern D-2

U [Tablica 3] su navedene tehničke karakteristike umjeravanog higrometra General Eastern.



Tablica 3. Tehničke karakteristike umjeravanog higrometra [9]

<b>Radno područje pokazne jedinice Hygro-M2</b>	
<b>Temperatura</b>	<b>od 0 °C do 50 °C</b>
<b>Relativna vlažnost</b>	<b>od 0 %rh do 85 %rh</b>
<b>Radno područje osjetnika D-2</b>	
<b>Rosište</b>	<b>od -40 °C do 85 °C</b>
<b>Temperatura okoline</b>	<b>od -15°C do 93 °C</b>
<b>Tlak</b>	<b>od 0 bardo 20 bar</b>

U nastavku je opisan postupak koji ovaj higrometar s hlađenim zrcalom koristi za mjerenje rosišta/injišta. Izvor svjetlosti obasjava poliranu površinu zrcala, a njegova se temperatura regulira pomoću Peltierovog elementa. Fotodetektor mjeri intenzitet svjetlosti reflektirane s površine zrcala. Kada je zrcalo čisto i suho, intenzitet reflektirane svjetlosti je maksimalan. Suprotno tome, hladno zrcalo s kondenziranom vodenom parom na površini raspršuje svjetlost, što rezultira manjim intenzitetom reflektirane svjetlosti. Primljena informacija o intenzitetu reflektirane svjetlosti koristi se kao povratna veza u zatvorenoj regulacijskoj petlji, a njome se može regulirati temperatura zrcala, što omogućava održavanje konstantne debljine sloja kondenzata ili inja na zrcalu. Sloj kondenzata ili inja konstantne debljine je u dinamičkoj ravnoteži sa zrakom koji okružuje zrcalo. U ovom ravnotežnom stanju, temperatura rosišta/injišta zraka se određuje mjerenjem temperature zrcala. Ako je poznato da je kondenzat u tekućem obliku, čak i za temperature niže od ledišta, tada se izmjerena temperatura zrcala uzima kao točka rose. Ako je poznato da je kondenzat u čvrstom obliku kao led ili inje, tada se izmjerena temperatura zrcala uzima kao injište. [10]

### 5.3. Kontrolni higrometar točke rose

Kao kontrolni higrometar rosišta/injišta korišten je higrometar švicarskog proizvođača MBW calibration, model 373 LHX, koji je prikazan na [Slika 15].



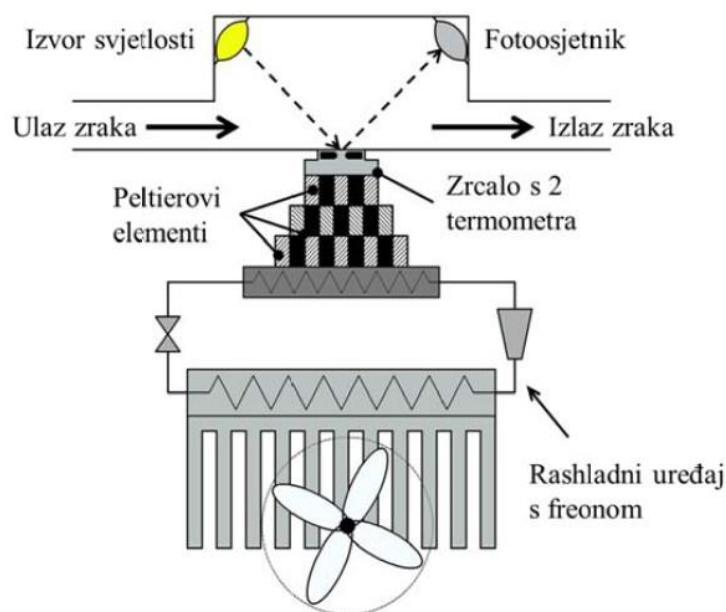
Slika 15. Higrometar točke rose MBW 373 LHX

U [Tablica 4] su prikazane tehničke karakteristike kontrolnog higrometra MBW 373 LHX.

Tablica 4. Tehničke karakteristike kontrolnog higrometra MBW 373 LHX [10]

<b>Radno područje točke rosišta/injišta</b>	<b>od -75°C do +95°C</b>
<b>Umjeravano područje točke rosišta/injišta</b>	<b>od -60°C do +95°C</b>
<b>Temperatura</b>	<b>od -50°C do +100°C</b>
<b>Tlak</b>	<b>od 500hPa do 2000hPa</b>
<b>TOČNOST</b>	
<b>Ročka rosišta/injišta za umjeravano područje</b>	<b>≤±0,1°C</b>
<b>Temperatura</b>	<b>≤±0,07°C</b>

U nastavku je opisan princip rada osjetnika injišta/rosišta s hlađenim zrcalom kontrolnog higrometra, a njegova shema je prikazana na [Slika 16].



Slika 16. Shema osjetnika injišta/rosišta s hlađenim zrcalom [4]

Osjetnik se sastoji od izvora svjetlosti, fotodetektora, zrcala, termometra i hladila. Zrak struji preko polirane površine ogledala, a njegova se temperatura može precizno regulirati pomoću Peltierovog elementa, termometra i regulatora.[3] Izvor svjetlosti obasjava zrcalo, a fotodetektor mjeri intezitet reflektirane svjetlosti sa zrcala. Intezitet reflektirane svjetlosti je maksimalan kada je zrcalo potpuno čisto, dok s pojavom sloja kondenzata ili leda počinje padati intezitet reflektirane svjetlosti. Temperatura zrcala se regulira pomoću Peltierovih elemenata. Posljednji Peltierov element se hladi pomoću rashladnog uređaja s freonom. Regulacijom temperature zrcala se održava konstantna debljina sloja kondenzata ili sloja leda na ogledalu. U tom je slučaju temperatura zrcala jednaka temperaturi rosišta/injišta zraka koji struji preko polirane površine zrcala.

#### 5.4. Mjerna postaja

Mjerna postaja se sastoji od:

- termometrijskog otporničkog mosta ALS F700
- višekanalne upravljačke jedinice ALS SB148
- multipleksora ALS SB158

Termometrijski otpornički most služi za mjerenje električnog otpora platinskih otporničkih osjetnika temperature, koji su pomoću četiri žice povezani na upravljačku jedinicu. Kako bi se omogućilo spajanje više termometara na otpornički most koristi se multipleksor. Ovaj most se koristi za mjerenje otpora u području od  $0,25 \Omega$  do  $400 \Omega$ . Na [Slika 17] je prikazana mjerna postaja.



Slika 17. Mjerna postaja

U [Tablica 5], [Tablica 6] i [Tablica 7] su prikazane tehničke karakteristike otporničkog mosta, višekanalne upravljačke jedinice i multipleksora.

Tablica 5. Tehničke karakteristike termometrijskog otporničkog mosta ALS F700

<b>Proizvođač</b>	<b>ASL</b>
<b>Model</b>	<b>F700</b>
<b>Napajanje</b>	<b>240/220/120/100 Vac</b>
<b>Frekvencija</b>	<b>50-60 Hz</b>
<b>Visina</b>	<b>155 mm</b>
<b>Širina</b>	<b>520 mm</b>

<b>Duljina</b>	<b>466 mm</b>
<b>Masa</b>	<b>15 kg</b>
<b>Radni uvjeti</b>	<b>0 °C - 30 °C ; 10 % - 90 %RH</b>
<b>Vrijeme balansiranja</b>	<b>20 sekundi za potpuni balans</b>

**Tablica 6. Tehničke karakteristike višekanalne upravljačke jedinice ALS SB148**

<b>Proizvođač</b>	<b>ASL</b>
<b>Model</b>	<b>SB148</b>
<b>Napajanje</b>	<b>220/240Vac</b>
<b>Frekvencija</b>	<b>47-63 Hz</b>
<b>Visina</b>	<b>133 mm</b>
<b>Širina</b>	<b>442 mm</b>
<b>Duljina</b>	<b>295 mm</b>
<b>Masa</b>	<b>7 kg</b>

**Tablica 7. Tehničke karakteristike multipleksora ALS SB158**

<b>Proizvođač</b>	<b>ASL</b>
<b>Model</b>	<b>SB158</b>
<b>Napajanje</b>	<b>220/240Vac</b>
<b>Frekvencija</b>	<b>47-63 Hz</b>
<b>Max Va</b>	<b>60 Va</b>
<b>Visina</b>	<b>88 mm</b>
<b>Širina</b>	<b>442 mm</b>
<b>Duljina</b>	<b>295 mm</b>
<b>Masa</b>	<b>7 kg</b>

### 5.5. Platinski otpornički osjetnici temperature

Za mjerenje svih temperatura tijekom umjeravanja su korišteni platinski otpornički osjetnici temperature. U [Tablica 8] su prikazani osjetnici temperature s pripadnim brojevima kanala multipleksora na koje su bili povezani.

**Tablica 8. Osjetnici temperature spojeni na višekanalni multipleksor**

<b>Kanal</b>	<b>Termometar</b>
<b>0</b>	<b>TEPOT20</b>
<b>1</b>	<b>TEPOT21 CVD</b>
<b>4</b>	<b>WIKA TR40 (LRS)</b>
<b>5</b>	<b>MBW LHX PRT2</b>

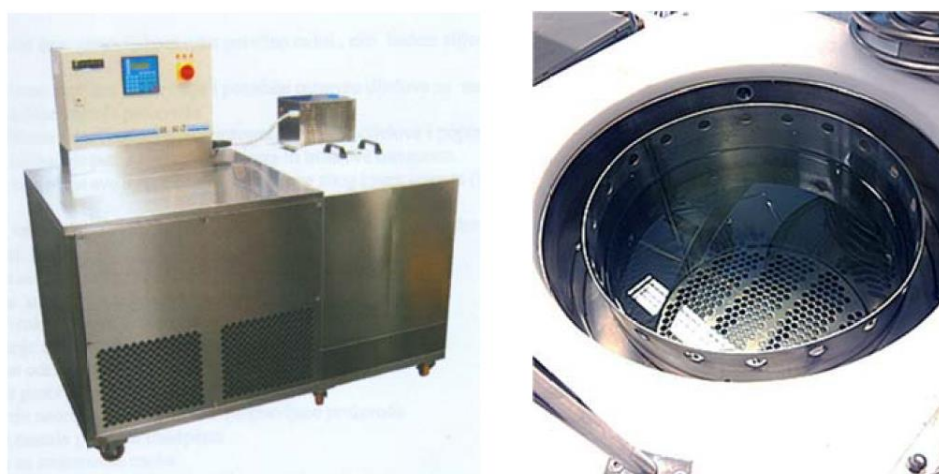
Za mjernu liniju prikazanu na [Slika 9], u termometrijsku kupku u koju je postavljen i niskotemperaturni saturator su uronjena dva etalonska osjetnika temperature s internim laboratorijskim oznakama TEPOT20 i TEPOT21. Oba osjetnika su postavljena na različite visine, u neposrednoj blizini saturacijske komore, kako bi se dobili podaci od jednolikosti temperature po visini kupke. Osjetnik oznake WIKA TR40 postavljen je u samoj saturacijskoj komori LRS-a. Za mjernu liniju prikazanu na [Slika 10], u termometrijsku kupku, u koju je postavljen i visokotemperaturni saturator, uronjena su dva osjetnika s oznakama TEPOT20 i TEPOT21, te su također postavljeni na različite visine. Osjetnik MBW LHX PRT2 je tvornički ugrađen u ogledalo kontrolnog higrometra MBW 373 LHX, te daje podatak o temperaturi injišta/rošišta.

### 5.6. Termometrijska kupka

Termometrijska kupka mora omogućiti precizno podešavanje temperature saturacije, budući da se saturator postavlja u radni volumen termometrijske kupke. Od velike je važnosti da temperaturni gradijenti kupke budu što je moguće manji uz što veću vremensku stabilnost. To znači da se uz manje gradijente i veću stabilnost kupke postižu manje nesigurnosti realizacije. Kupka je iskonstruirana u obliku dvije paralelne cijevi. U jednoj cijevi su smješteni grijač, hladnjak i

termometar za regulaciju temperature, dok je druga cijev zapravo radni volumen kupke.[4] Za mjerenja s niskotemperaturnim saturatorom kao radni medij je korišten 96%-tni denaturirani etilni alkohol, budući da se koristio u temperaturnom području  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Za mjerenja s visokotemperaturnim saturatorom kao radni medij je korištena voda, budući da se mjerenja rade u temperaturnom području  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Na [Slika 18] je prikazana termometrijska kupka, a u [Tablica 9] su prikazane njene tehničke karakteristike.



Slika 18. Kupka za regulaciju temperature saturatora [4]

Tablica 9. Tehničke karakteristike termometrijske kupke [4]

<b>Proizvođač</b>	<b>Kambič Laboratorijska oprema</b>
<b>Model</b>	<b>OB – 50LT</b>
<b>Temperaturno područje</b>	<b><math>-70\text{ }^{\circ}\text{C}</math> do <math>60\text{ }^{\circ}\text{C}</math></b>
<b>Radni volumen</b>	<b>Cca. 60 L (<math>\varnothing</math> 320x430 mm)</b>
<b>Temperaturna stabilnost</b>	<b><math>\leq \pm 0,02\text{ }^{\circ}\text{C}</math></b>
<b>Brzina hlađenja</b>	<b>cca. <math>11\text{ }^{\circ}\text{C h}^{-1}</math></b>
<b>Brzina zagrijavanja</b>	<b>cca. <math>25\text{ }^{\circ}\text{C h}^{-1}</math></b>

## 5.7. Sustav za pripremu zraka

Sustav za pripremu zraka služi kako bi se osigurao filtrirani i suhi zrak za napajanje saturatora. Pomoću ovog sustava je moguće podešavati tlak i protok zraka. Sustav za pripremu zraka, koji je prikazan na [Slika 19], sastoji se od sljedećih komponenti:

- bezuljni kompresor
- spremnik zraka
- adsorpcijski sušač zraka
- čestični filter
- precizni regulator tlaka
- rotametar s preciznim ventilom

Bezuljni kompresor proizvođača Kaeser, modela DENTAL 5 služi za dopremanje zraka iz okoliša. Kompresor ima efektivni kapacitet 262 L/min, maksimalan pretlak 7 bara, te je serijski opremljen spremnikom zraka volumena 65 L. Komprimirani zrak se vodi do većeg spremnika koji ima volumen 250 L. Zatim se zrak iz spremnika dovodi u adsorpcijski sušač u kojemu se suši do temperature injišta od približno -40 °C. Sušenje zraka je potrebno obaviti kako bi se smanjilo opterećenje saturatora, te povećala njegova učinkovitost u donjem dijelu radnog područja. Koristi se adsorpcijski sušač proizvođača Dominick Hunter, model PNEUDRI MiDAS – DAS3, a dodatno je opremljen filterom koji služi za uklanjanje čestica nečistoća većih od 10 nm. Filtriranje zraka je izuzetno važno zbog održavanja čistoće cijevi i komora, a time i ispravnog rada saturatora. Tlak zraka se regulira pomoću tri regulatora. U prvom stupnju se regulacija vrši pomoću regulatora tvrtke Festo, modela LRP-1/4-9,7, te daljnje reguliranje tlaka se vrši pomoću dva precizna regulatora tvrtke Parker, modela R230G02. Protok zraka kroz saturator se mjeri i regulira pomoću rotametra proizvođača Yokogava, modela RAGL, koji ima radno područje od 0,2 L/min do 3,0 L/min. [4]





Slika 19. Komponente sustava za pripremu zraka [4]

### 5.8. Termostatirana komora

Termostatirana komora je korištena za održavanje temperature umjeravanog osjetnika injišta/rosišta iznad rosišta zraka koji kroz njega prolazi, čime se sprječava pojava kondenzata u samom osjetniku. Komora je Hrvatski proizvod tvrtke INKOLAB, a prikazana je na [Slika 20]. Komora ima radno područje temperatura od  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Opremljena je regulatorom temperature tvrtke JUMO QUANCONTROL LC300.[11] Cirkulacija radnog medija unutar komore je omogućena pomoću ventilatora. Po cijelim unutrašnjim ploham komore su smješteni izmjenjivači, kroz koje postoji mogućnost strujanja medija.



Slika 20. Termostatirana komora

Tablica 10. Tehničke karakteristike termometrijske kupke [11]

<b>Proizvođač</b>	<b>INKOLAB</b>
<b>Model</b>	<b>BTF200L</b>
<b>Kapacitet radnog medija</b>	<b>200 L</b>
<b>Vanjske dimenzije</b>	
<b>visina</b>	<b>1065 mm</b>
<b>širina</b>	<b>725 mm</b>
<b>dubina</b>	<b>600 mm</b>
<b>Unutarnje dimenzije</b>	
<b>visina</b>	<b>800 mm</b>
<b>širina</b>	<b>550 mm</b>
<b>dubina</b>	<b>450 mm</b>

### 5.9. Precizni barometar

Za mjerenje tlaka korišten je barometar finskog proizvođača Vaisala, model PTB330. Tlak zraka je potrebno mjeriti u saturatoru i u neposrednoj blizini osjetnika injišta/rosišta zraka umjeravanog instrumenta kako bi se mogla izvršiti korekcija injišta/rosišta zraka s obzirom na pad tlaka. [4] Na [Slika 21] je prikazan barometar Vaisala PTB330, a u [Tablica 11] su prikazane njegove tehničke karakteristike.



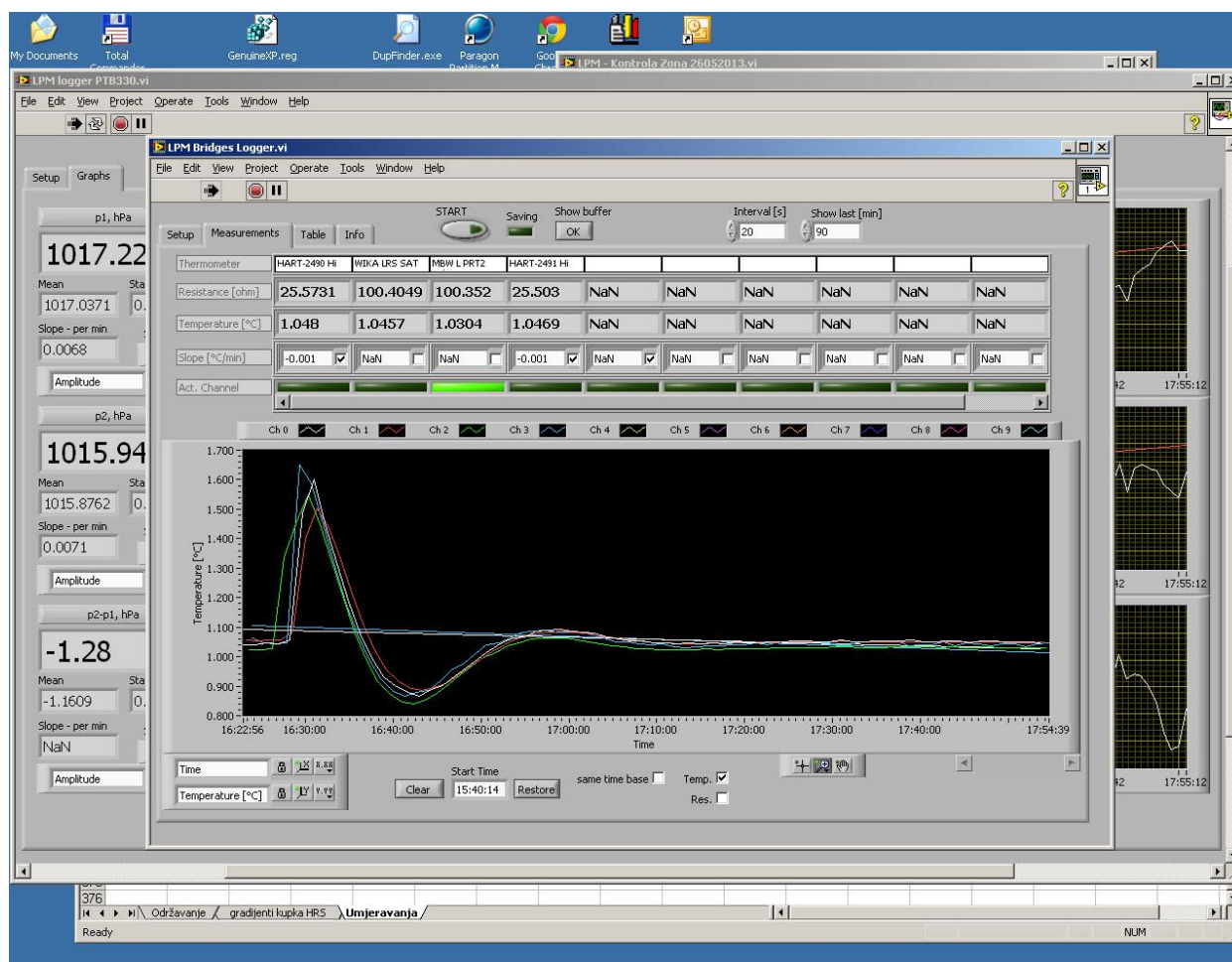
Slika 21. Precizni barometar [4]

Tablica 11. Tehničke karakteristike preciznog barometra Vaisala PTB330 [4]

Mjerno područje	500 hPa do 1100 hPa
Rezolucija	0,01 hPa
Brzina odziva	2 s
Detektirana točnost	$\pm 0,15$ hPa
Linearnost	$\pm 0,05$ hPa
Histereza	$\pm 0,08$ hPa <sup>-1</sup>
Ponovljivost	$\pm 0,08$ hPa
Godišnja stabilnost	$\pm 0,10$ hPa

### 5.10. Računalni programi

Računalni programi omogućuju istovremeno praćenje i bilježenje očitavanja svih potrebnih instrumenata, što ručno nije moguće. Pomoću programa je moguće pratiti očitavanja sa sljedećih instrumenata: četiri termometra, dva higrometra točke rose, i dva barometara. Ovi programi uz očitavanje izmjerenih podataka omogućuju i njihov grafički ili tablični prikaz. Sve programe izradili su zaposlenici LPM-a unutar programskog sučelja „Lab View“. Na [Slika 22] je prikazan primjer programa za očitavanje temperatura s termometrijskog otporničkog mosta.



Slika 22. Program za očitavanje temperatura s termometrijskog otporničkog mosta

## 6. MJERNA NESIGURNOST

### 6.1. Osnove o mjernoj nesigurnosti

Kod prikazivanja rezultata dobivenih mjerenjima potrebno je procijeniti i kvalitetu rezultata mjerenja. U većini slučajeva nije moguće izravno procijeniti kvalitetu, što ovisno o korisniku rezultata, rezultate čini međusobno nejdnakima. Ako nije dana procjena nesigurnosti, te korisnik mjernog rezultata nema znanja o parametrima koji utječu na mjerenja, njegov pogled na kvalitetu rezultata uglavnom se temelji na broju prikazanih decimala ili znamenki. S druge strane, korisnik s velikim mjeriteljskim iskustvom prilikom razmatranja kvalitete rezultata koristi uglavnom svoje znanje, te na temelju njega donosi zaključke o kvaliteti. Zaključci izvedeni iz rezultata djelomično se temelje na pretpostavkama i pogađanjima, jer je kvaliteta procijenjena bez znanja o stvarnom postavu i poznavanju svih činjenica i utjecajnih parametara tijekom mjerenja. Posebno kod mjerenja vlažnosti, stvarna nesigurnost je često i do nekoliko desetaka puta veća od očekivanja neiskusnog korisnika. Očigledno je da je rezultat mjerenja bez izjave o mjernoj nesigurnosti nepotpun i ne daje dovoljno informacija. Potrebne informacije možemo dati samo ako smo analizirali naša mjerenja i izvršili procjenu nesigurnosti. Nikada nećemo znati sve parametre koji utječu na rezultate mjerenja, ali moramo biti u mogućnosti identificirati i kvantificirati parametre koji značajno utječu na rezultate, tj. procijeniti nesigurnost. [12]

Postoji mnogo izvora nesigurnosti prilikom mjerenja, a neki od njih su:

- Nepotpuno određivanje mjerene veličine.
- Nedovoljno poznavanje djelovanja uvjeta okoliša na mjerenje ili nesavršeno mjerenje uvjeta okoliša.
- Osobna pristranost u očitavanju analognih instrumenata.
- Konačno razlučivanje instrumenata.
- Netočne vrijednosti mjernih etalona i referentnih tvari.
- Netočne vrijednosti konstanti i drugih parametara dobivenih iz vanjskih izvora i upotrebljivanih u algoritmu za obradu podataka.
- Približna određenja i pretpostavke uključene u mjernu metodu i postupak.
- Promjene rezultata ponovljenih mjerenja u istovjetnim uvjetima. [13]

Od velike je važnosti razlikovati pojmove pogreška i nesigurnost. Pogreška je razlika između izmjerene i prave vrijednosti, dok je nesigurnost procjena sumnje u rezultat njeranja ili umjeravanja. [12]

## 6.2. Procjena mjerne nesigurnosti

Procjena mjerne nesigurnosti se provodi iz razloga što mjerenja nisu savršena. Procjenjuje se kako ne bi došlo do dvosmislenih iskazivanja i usporedbe mjernih rezultata dobivenih u različitim laboratorijima. [13]

Osam glavnih koraka za procjenu nesigurnosti

1. Odlučite što trebate saznati iz svojih mjerenja. Koja su stvarna mjerenja i izračuni potrebni za konačni rezultat? Formulirajte matematički model (uključujući komponente s procjenom nula).
2. Provedite potrebna mjerenja.
3. Procijenite nesigurnost svake ulazne veličine koja se unosi u konačni rezultat. Pronađite relevantne koeficijente osjetljivosti pomoću matematičkog modela. Izrazite sve nesigurnosti dosljednim izrazima.
4. Odlučite hoće li ulazne veličine biti neovisne jedna o drugoj. Ako mislite da nisu, onda su potrebni dodatni izračuni ili informacije (korelacije).
5. Izračunajte procjenu svog rezultata mjerenja (uključujući sve poznate korekcije, npr. kao što je umjeravnje).
6. Odredite kombiniranu standardnu nesigurnost iz svih pojedinačnih utjecajnih nesigurnosti.
7. Izrazite nesigurnost u smislu veličine intervala nesigurnosti, zajedno s faktorom pokrivenosti i navedite razinu pouzdanosti.
8. Zabilježite rezultat mjerenja i nesigurnost i navedite kako ste dobili oboje.

Procjena mjerne nesigurnosti se prema osnovnoj statistici skupa brojeva može provesti iz ponovljenih mjerenja:

- prosjek ili srednja vrijednost - kako bi se dobila bolja procjena prave vrijednosti
- standardna devijacija - kao bi se prikazala širina očitavanja, što govori o nesigurnosti rezultata.

Razlikuju se dva načina za procjenu mjerne nesigurnosti:

- Tip A - procjena mjerne nesigurnosti primjenom statističke analize vrijednosti izmjerenih uz definirane uvjete mjerenja.
- Tip B - procjena mjerne sigurnosti na sve ostale načine, npr: iz tehničkih specifikacija i ostalih dostupnih podataka o mjernoj opremi, iz potvrde o umjeravanju, iz iskustva, iz znanja... [12]

### 6.2.1. Procjena mjerne nesigurnosti - Tip A

Mjerna nesigurnost Tipa A se temelji 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.

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (24)$$

Zbog slučajnih promjena utjecajnih parametara, pojedinačna opažanja  $q_k$  se međusobno razlikuju po vrijednosti. Eksperimentalna varijanca  $s^2(q_k)$ , daje procjenu varijance razdiobe vjerojatnosti veličine  $q_k$ :

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2 \quad (25)$$

gdje je:

$q_k$  - pojedinačna opažanja [-]

$\bar{q}$  - aritmetička sredina ili prosjek [-]

$n$  - broj neovisnih promatranja [-]

$s^2(q_k)$  - eksperimentalna varijanca [-]

Najbolja procjena varijance srednje vrijednosti  $\bar{q}$  je eksperimentalna varijanca srednje vrijednosti, a dana je izrazom:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n} \quad (26)$$

Procjena varijance i njezin pozitivan drugi korijen se naziva eksperimentalna standardna devijacija srednje vrijednosti. Opisuje promjenjivost promatranih vrijednosti mjerenja, tj. njihovo rasipanje oko srednje vrijednosti. Eksperimentalna standardna devijacija srednje vrijednosti  $s(\bar{q})$  može se upotrebljavati kao mjerna nesigurnost srednje vrijednosti  $\bar{q}$ :

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q}) \quad (27)$$

gdje je:

$s(\bar{q})$  - eksperimentalna standardna devijacija srednje vrijednosti [-]

$u(\bar{q})$  - mjerna nesigurnost srednje vrijednosti  $\bar{q}$  [-]

Za dobro opisana mjerenja pod statičkom kontrolom kada se vrijednost mjerene veličine  $q$  određuje iz  $n$  neovisnih opažanja, eksperimentalna varijanca tih opažanja bolje se procjenjuje pomoću uzdužne ili kombinirane procjene varijance  $s_p^2$ . U tom slučaju bolje se procjenjuje pomoću  $s_p^2/n$ , nego pomoću  $s^2(\bar{q})/n$ , a standardna mjerna nesigurnost je jednaka izrazu:

$$u_A = \frac{s_p}{\sqrt{n}} \quad (28)$$

gdje je:

$u_A$  - standardna mjerna nesigurnost Tipa A [-]

$s_p$  - uzdužna ili kombinirana standardna devijacija [-]

### 6.2.2. Procjena mjerne nesigurnosti - Tip B

Kod procjene mjerne nesigurnosti Tipa B, procjena varijance  $u(x_i)_B^2$  ili standardna nesigurnost  $u(x_i)_B$  procjenjuje se znanstvenom prosudbom koja se temelji na svim raspoloživim podacima. U takav skup podataka spadaju:

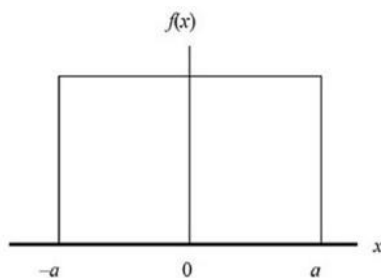
- mjerni podaci od prethodnih mjerenja
- znanje i iskustvo o tvarima i instrumentima, tj. općenito poznavanje karakteristika tvari i instrumenata
- poznavanje specifikacija proizvođača



- podaci koji su dani u potvrdama o umjeravanju ili u nekim drugim potvrdama
- nesigurnosti koje su dodijeljene podacima koji su uzeti iz priručnika

Za proračun standardne mjerne nesigurnosti Tipa B potrebna je ispravna uporaba skupa raspoloživih podataka, te se zahtjeva sposobnost opažanja temeljena na iskustvu i općem znanju. Postoji nekoliko načina za procjenu standardne mjerne nesigurnosti Tipa B, od kojih su svi međusobno podjednako točni, ali se razlikuju po načinu iskaza.

U prvom slučaju procjena se uzima iz specifikacija proizvođača, potvrde o umjeravanju, priručnika ili nekih drugih izvora. [13] Ukoliko su o nekom instrumentu 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  $\pm a$ . [14] Takva razdioba se naziva pravokutnom, te je prikazana na [Slika 23].

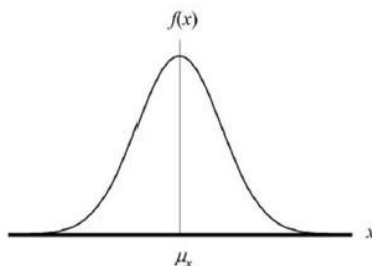


Slika 23. Skica pravokutne razdiobe [15]

U ovom slučaju se iskazana nesigurnost navodi kao poseban višekratnik standardnog odstupanja, a određuje se pomoću jednadžbe [15]:

$$u(x)_B = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (29)$$

U drugom slučaju pretpostavlja se da je za izračunavanje nesigurnosti upotrebljava normalna razdioba prikazana na [Slika 24]. [13]



Slika 24. Skica normalne razdiobe [15]

Dijeljenjem nesigurnosti odgovarajućim faktorom pokrivanja za normalnu razdiobu dobiva se standardna mjerna nesigurnost procjene  $x_i$ , a izraženo je pomoću jednadžbe: [15]

$$u(x)_B = \frac{U(x)}{k_p} \quad (30)$$

gdje je:

$U(x)$  - mjerna nesigurnost [-]

$k_p$  - faktor pokrivanja [-]

$u(x)_B$  - standardna mjerna nesigurnost [-]

Faktori pokrivanja i razine povjerenja koje odgovaraju tim faktorima su dani u [Tablica 12].

Tablica 12. Razine povjerenja i faktori proširenja za normalnu razdiobu [13]

Razina povjerenja $P(\%)$	Faktor pokrivanja $k_p$
68,27	1
90	1,645
95	1,960
95,45	2
99	2,576
99,73	3

### 6.2.3. Proširena mjerna nesigurnost

Proširena mjerna nesigurnost obuhvaća interval oko mjernog područja za koji se može smatrati da će obuhvaćati veliki dio razdiobe vrijednosti koja bi se mogla pripisati mjernoj veličini. Proširena

mjerna nesigurnost  $U$  dobiva se množenjem složene standardne nesigurnosti  $u_c(y)$  s faktorom pokrivanja  $k$ , a dana je izrazom:

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (31)$$

gdje je:

$U$  - proširena mjerna nesigurnost [-]

$u_c(y)$  - sastavljena standardna nesigurnost [-]

Vrijednost faktora pokrivanja  $k$  za praktična mjerenja se najčešće kreće u području između 2 i 3. Za slučaj kada je razdioba vjerojatnosti opisana s  $y$  i  $u_c(y)$  približno normalna, a broj stupnjeva slobode sastavljene standardne nesigurnosti  $u_c(y)$  značajan po iznosu, najčešće se uzima faktor pokrivanja  $k = 2$  koji osigurava interval uz vjerojatnost od približno od  $P=95\%$ . [13]

### 6.3. Mjerne nesigurnosti pri umjeravanju točke iništa/rosišta

Glavni uzroci mjerne nesigurnosti pri umjeravanju higrometara pomoću generatora iništa/rosišta zraka su povezani s:

- mjerenjem temperature saturatora
- mjerenjem pada tlaka između saturatora i umjeravanog instrumenta
- nesigurnosti povezane s umjeravanim instrumentom

#### 6.3.1. Temperatura saturatora

- $u(t_{s\,mea})$  - standardna nesigurnost tipa A za najmanje 30 očitavanja izmjerene temperature saturatora koja su zabilježena u vremenskom periodu od najmanje 30 minuta, počevši od trenutka kada je mjerni sustav postao stabilan. Standardna nesigurnost temperature saturatora tj. temperature zasićenja se računa iz  $n$  očitavanja temperature zasićenja  $t_{s\,mea}$  izmjerenih pomoću platinskih otporničkih osjetnika temperature smještenih u blizini saturacijske komore i pripadnog termometrijskog otporničkog mosta. Ova nesigurnost se računa pomoću izraza:

$$u(t_{s\,mea}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_{s\,mea\,i} - \bar{t}_{s\,mea})^2}{n(n-1)}} \quad (32)$$

gdje je  $t_{s\,mea\,i}$  jedno očitavanje  $t_s$ , a  $\bar{t}_{s\,mea}$  je srednja vrijednost  $n$  mjerenja. Broj mjerenja je najčešće 10 a u ovom radu je korišteno 30 očitavanja. Radi pojednostavljenja, u obzir je uzeta samo najveća nesigurnost izračunata za jedan od korištenih termometara.

### 6.3.2. Termometar

- $u(t_{s\,PRT\,cal})$  - nesigurnost umjeravanja platinskog otporničkog osjetnika temperature
- $u(t_{s\,PRT\,drift})$  - nesigurnost dugoročne stabilnosti platinskog otporničkog osjetnika temperature
- $u(t_{s\,PRT\,Self\,heat})$  - nesigurnost samozagrijavanja platinskog otporničkog osjetnika temperature
- $u(t_{s\,PRT\,heat\,flux})$  - nesigurnost zbog utjecaja dubine uranjanja, odnosno utjecaj toplinskog toka između okoline i osjetnika temperature, kroz zaštitnu cijev osjetnika.

### 6.3.3. Otpornički most

- $u(t_{s\,Bridge\,cal})$  - nesigurnosti umjeravanja termometrijskog otporničkog mosta
- $u(t_{s\,Bridge\,res})$  - nesigurnost zbog rezolucije termometrijskog otporničkog mosta
- $u(t_{s\,Bridge\,drift})$  - nesigurnost zbog dugoročne stabilnost termometrijskog otporničkog mosta

### 6.3.4. Saturator

- $u(t_{s\,unif})$  - nesigurnost zbog postojanja temperaturnih gradijenta u glavnoj saturacijskoj komori.
- $u(t_{s\,eff})$  - nesigurnost povezana s učinkovitosti saturatora. Uključuje učinkovitost saturatora i absorpciju/desorpciju vodene pare na unutarnjim površinama saturatora.
- $u(t_{s\,bath\,unif})$  - nesigurnost zbog gradijenata i stabilnosti temperature kupke. Uključuje radijalne i aksijalne temperaturne gradijente.
- $u(t_{s\,stability})$  - nesigurnost zbog temepraturne stabilnosti kupke.

- $u(t_{s \text{ water}})$  - nesigurnost zbog onečišćenja vode u posudama saturatora. Injište/rosište zraka se smanjuje s nečistoćama. Ako je moguće procjenjuju se iz literature. U rasponu onečišćenja od 10 nm – 20 nm,  $t_d$  se može smanjiti za 1 mK do 2 mK. Neki izvori navode dosta niže vrijednosti od oko 0,2 mK. Zbog malog utjecaja mogu se ponekad zanemariti.
- $u(t_{s \text{ air}})$  - nesigurnost zbog onečišćenje zraka (dušika), može se procijeniti na temelju dostupne literature. U velikom broju slučajeva se mogu također zanemariti zbog malog utjecaja.

### 6.3.5. Tlak zraka u saturatoru

- $u(P_{s \text{ meas}})$  - nesigurnost tipa A za izmjereni tlak zraka u saturatoru
- $u(P_{s \text{ cal}})$  - nesigurnost umjeravanja mjerila apsolutnog tlaka zraka u saturatoru
- $u(P_{s \text{ res}})$  - nesigurnost zbog rezolucije mjerila apsolutnog tlaka zraka u saturatoru
- $u(P_{s \text{ drift}})$  - nesigurnost zbog povezana s dugoročnom stabilnošću mjerila tlaka
- $u(P_{s \text{ aero head}})$  – nesigurnost zbog razlike visina komore saturatora i osjetnika za mjerenje tlaka (aerostatski tlak).  $P_{s \text{ aero head}} = \kappa g \Delta h$ , gdje je  $\kappa$  specifična gustoća zraka u cijevima kojima je mjerilo tlaka povezano sa saturacijskom komorom,  $g$  ubrzanje sile teže i  $\Delta h$  razlika u visini između saturacijske komore i osjetnika mjerila tlaka. Ukoliko razlika visina nije velika ne provodi se korekcija očitavanja tlaka već se ta razlika u obzir uzima kao doprinos nesigurnosti.
- $u(P_{s \text{ stability}})$  - nesigurnost zbog nestabilnosti tlaka u komori saturatora, procijenjena na temelju većeg broja mjerenja

### 6.3.6. Tlak zraka u neposrednoj blizini umjeravanog osjetnika injišta/rosišta zraka

- $u(P_{d \text{ meas}})$  - nesigurnost tipa A za izmjereni tlak zraka u neposrednoj blizini osjetnika injišta/rosišta zraka umjeravanog instrumenta
- $u(P_{d \text{ cal}})$  - nesigurnost umjeravanja mjerila apsolutnog tlaka zraka u neposrednoj blizini osjetnika injišta/rosišta zraka umjeravanog instrumenta
- $u(P_{d \text{ res}})$  - nesigurnost zbog rezolucije mjerila apsolutnog tlaka zraka u neposrednoj blizini osjetnika injišta/rosišta zraka umjeravanog instrumenta

- $u(P_{d \text{ drift}})$  - nesigurnost zbog povezana s dugoročnom stabilnošću mjerila tlaka
- $u(P_{d \text{ aero head}})$  – nesigurnost zbog razlike visina osjetnika injišta/rošišta zraka umjeravanog instrumenta i osjetnika instrumenta za mjerenje tlaka (aerostatski tlak).  
 $P_{d \text{ aero head}} = \kappa g \Delta h$ , gdje je  $\kappa$  specifična gustoća zraka u cijevima kojima je mjerilo tlaka povezano s osjetnikom injišta/rošišta zraka umjeravanog instrumenta,  $g$  ubrzanje sile teže i  $\Delta h$  razlika u visini između osjetnika injišta/rošišta zraka umjeravanog instrumenta i osjetnika mjerila tlaka. Ukoliko razlika visina nije velika ne provodi se korekcija očitavanja tlaka već se ta razlika u obzir uzima kao doprinos nesigurnosti.
- $u(P_{d \text{ stability}})$  - nesigurnost zbog nestabilnosti tlaka u neposrednoj blizini osjetnika injišta/rošišta zraka umjeravanog instrumenta.

### 6.3.7. Umjeravani higrometar

U okviru ovog rada umjeren je higrometar točke rose s hlađenim ogledalom proizvođača General Eastern. Za procjenu njegovog utjecaja na ukupnu nesigurnost umjeravanja u obzir su uzeti sljedeći parametri:

- $u(t_{DUT \text{ mea}})$  - standardna nesigurnost tipa A za najmanje 30 očitavanja injišta/rošišta zraka koja su zabilježena u vremenskom periodu od najmanje 30 minuta, počevši od trenutka kada je mjerni sustav postao stabilan. Ova nesigurnost se računa iz  $n$  očitavanja umjeravanog instrumenta, pomoću sljedećeg izraza::

$$t_{DUT \text{ mea}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_{DUT \text{ mea } i} - \bar{t}_{DUT \text{ mea}})^2}{n(n-1)}} \quad (33)$$

gdje je  $t_{DUT \text{ mea } i}$  jedno očitavanje injišta/rošišta, a  $\bar{t}_{DUT \text{ mea}}$  je srednja vrijednost  $n = 35$  očitavanja.

- $u(t_{DUT \text{ res}})$  - nesigurnost zbog rezolucije umjeravanog instrumenta
- $u(t_{DUT \text{ hys}})$  - nesigurnost zbog histereze umjeravanog instrumenta
- $u(t_{DUT \text{ stability}})$  – nesigurnost zbog kratkotrajne stabilnosti umjeravanog instrumenta tijekom umjeravanja [8]

**6.3.8. Rezultat mjerenja**

- $t_s$  - referentno injište/rošište zraka ostvareno pomoću primarnih generatora
- $t_d$  - injište/rošište izmjereno umjeravanim instrumentom
- $u(t_d)$  - kombinirana nesigurnost umjeravanja
- $k = 2$  - faktor prekrivanja uz razinu pouzdanosti od 95 %
- $U(t_d)$  - proširena nesigurnost umjeravanja

Sve opisane mjerne nesigurnosti su navede u tablicama budžeta nesigurnosti, koje su dane za svaku umjernu točku.

## 7. REZULTATI UMJERAVANJA ETALONSKOG MJERILA INJIŠTA I ROSIŠTA ZRAKA

### 7.1. Rezultati umjeravanja higrometra General Eastern

U sljedećim tablicama i dijagramima su prikazani dobiveni rezultati umjeravanja higrometra točke rose s hlađenim ogledalom, proizvođača General Eastern.

U [Tablica 13] su prikazane referentne vrijednosti temperature injišta/rosišta generiranog zraka, vrijednosti temperatura koje pokazuje umjeravani higrometar točke rose, te odstupanje očitavanja umjeravanog instrumenta u odnosu na referentno injište/ rosište.

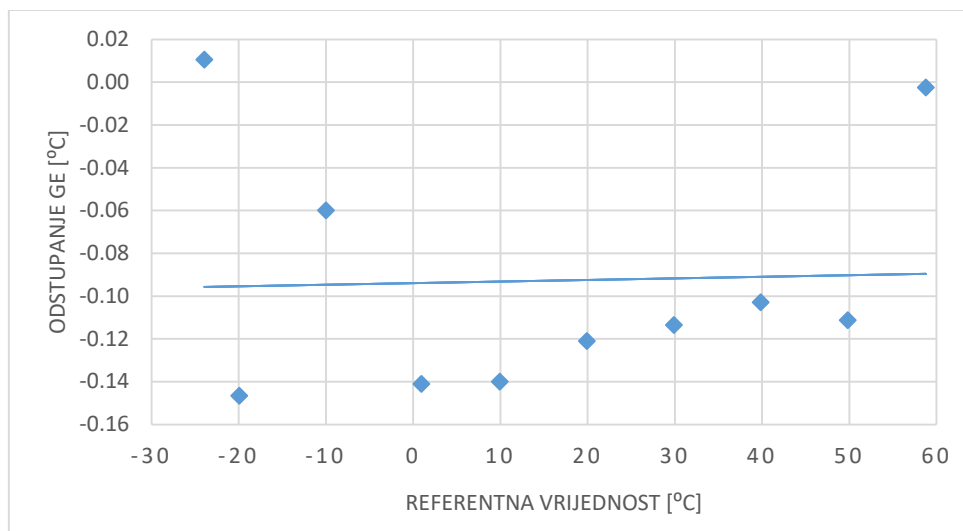
**Tablica 13. Vrijednosti odstupanja umjeravanog higrometra GE**

Referentna vrijednost [°C]	Umjeravani instrument GE [°C]	Odstupanje GE [°C]
-23.949	-23.938	0.011
-19.961	-20.107	-0.147
-10.006	-10.066	-0.060
0.949	0.808	-0.141
9.951	9.811	-0.140
19.916	19.795	-0.121
29.886	29.772	-0.114
39.843	39.741	-0.103
49.824	49.713	-0.111
58.794	58.791	-0.003

Na [Slika 25] su grafički prikazana odstupanja umjeravanog higrometra točke rose GE u odnosu na referentnu temperaturu injišta/ rosišta, te je prikazana linearna funkcija  $C(t_{dp})$  koja se može koristiti za izračun korekcija očitavanja umjeravanog instrumenta u ovisnosti o izmjerenom injištu/rosištu:

$$C(t_{dp}) = 0.094004526 - 7.1146357 \cdot 10^{-5} \cdot t_{dp} \quad (34)$$





Slika 25. Grafički prikaz odstupanja higrometra GE u odnosu na referentna injišta/rosišta

## 7.2. Proširena mjerna nesigurnost

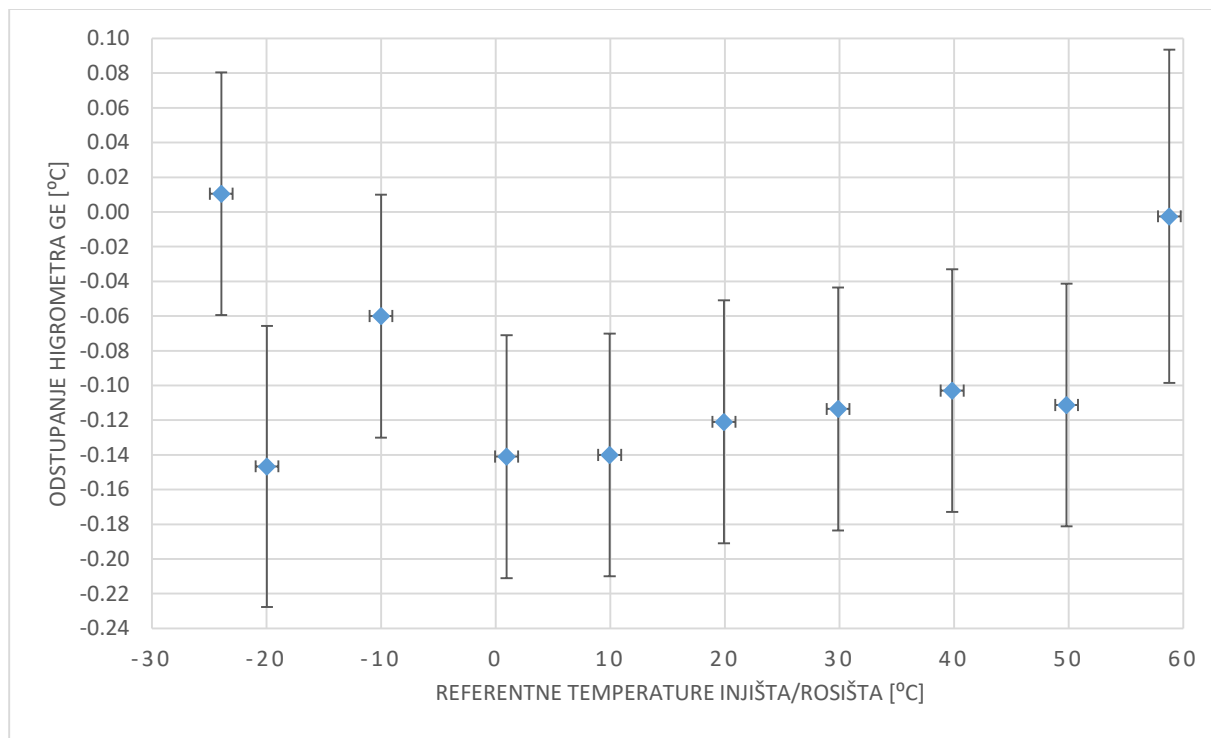
Proširena nesigurnost umjeravanja se dobiva množenjem standardne nesigurnosti s faktorom pokrivanja  $k = 2$ , što za normalnu raspodjelu znači razinu pouzdanosti od približno 95 %. Ukupna nesigurnost uzima u obzir nesigurnosti etalona, metode umjeravanja i umjeravanog higrometra.

U [Tablica 14] su prikazane vrijednosti proširene mjerne nesigurnosti za svaku umjernu točku.

Tablica 14. Vrijednosti proširenih mjernih nesigurnosti za umjeravanje higrometra GE

Referentna temperatura injišta/rosišta [°C]	Temperatura injišta/rosišta očitana s Hydro-M2 GE [°C]	Odstupanje higrometra GE [°C]	Proširena mjerna nesigurnost ( $k=2$ )
-23.949	-23.938	0.011	0.070
-19.961	-20.107	-0.147	0.081
-10.006	-10.066	-0.060	0.070
0.949	0.808	-0.141	0.070
9.951	9.811	-0.140	0.070
19.916	19.795	-0.121	0.070
29.886	29.772	-0.114	0.070
39.843	39.741	-0.103	0.070
49.824	49.713	-0.111	0.070
58.794	58.791	-0.003	0.096

Na [Slika 26] su grafički prikazane proširene mjerne nesigurnosti za svaku umjernu točku.



Slika 26. Grafički prikaz proširenih mjernih nesigurnosti za higrometar GE

### 7.3. Budžeti nesigurnosti higrometra

Budžet nesigurnosti umjeravanog higrometra General Eastern izrađen je zasebno za svaku umjernu točku. U sljedećim tablicama dan je prikaz budžeta nesigurnosti za točke: -25 °C ; -20 °C ; -10 °C ; 1 °C ; 10 °C ; 20 °C ; 30 °C ; 40 °C ; 50 °C i 60 °C.

Tablica 15. Budžet nesigurnosti za umjernu točku -25 °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	
<b>Saturation temperature</b>									
Measured saturation temperature	$t_{s, \text{meas}}$	-23.945	°C	0.002	K	normal (1 $\sigma$ )	1	[-]	0.0015
<b>Thermometer (Pt 100)</b>									
Calibration of PRT	$u(t_{s, \text{PRT cal}})$	0	mK	7.8	mK	normal (2 $\sigma$ )	1	[-]	0.0039
Long-term stability (drift) of PRT	$u(t_{s, \text{PRT drift}})$	0	mk	15.1	mK	rectangular	1	[-]	0.0087
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
<b>Resistance bridge(F700+EOFIX05)</b>									
RB Linearity	$u(t_{s, \text{Bridge cal}})$	0	ppm	2	ppm	normal (2 $\sigma$ )	0.000980021	°C/ppm@tS	0.0010
RB Resolution	$u(t_{s, \text{Bridge res}})$	0	ppm	1	ppm	rectangular	0.000980021	°C/ppm@tS	0.0003
RB AC/DC		0	ppm	2	ppm	rectangular	0.000980021	°C/ppm@tS	0.0011
RB internal insul leakage		0	mK	1	mK	normal (1 $\sigma$ )	1	[-]	0.0010
RS Calibration		99.99967	$\Omega$	0.4	ppm	normal (2 $\sigma$ )	0.000225332	°C/ppm@tS	0.0000
RS drift		0	$\Omega$	0.1	ppm	rectangular	0.000225332	°C/ppm@tS	0.0000
RS temperature stability	$u(t_{s, \text{Bridge drift}})$	0	$\Omega$	0.0002	m $\Omega$	rectangular	2.253331078	°C/ $\Omega$ @tS	0.0003
<b>Saturator</b>									
Saturator temp. gradients	$u(t_{s, \text{unit}})$	0	mK	10.4	mK	rectangular	1	[-]	0.0060
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	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
<b>Pressure in saturator</b>									
Measured saturation pressure	$u(P_{s, \text{meas}})$	1006.39	mbar	0.223	mbar	normal (1 $\sigma$ )	0.01	°C/mbar	0.0022
Calibration	$u(P_{s, \text{cal}})$	0	mbar	0.06	mbar	normal (2 $\sigma$ )	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
<b>Pressure at DUT</b>									
Measured pressure at DUT	$u(P_{d, \text{meas}})$	1006.08	mbar	0.212	mbar	normal (1 $\sigma$ )	0.01	°C/mbar	0.0021
Calibration	$u(P_{d, \text{cal}})$	0	mbar	0.06	mbar	normal (2 $\sigma$ )	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 $\Delta P = P_d - P_s$	$\Delta P$	-0.31	mbar						
Dew-point correction for $\Delta P$	$\Delta t_d$	-0.003	°C				0.01	°C/mbar	
<b>Hygrometer under calibration (DUT)</b>									
Measured dew-point temperature	$u(t_{\text{DUT meas}})$	-23.938	°C	0.010	K	normal (1 $\sigma$ )	1	[-]	0.0103
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	$t_d$	-23.949	°C			Combined uncertainty, $u(t_d)$			0.0330
	deviation	0.011	°C			Coverage factor $k$			2
						Expanded uncertainty $U(t_d)$			0.0660

Tablica 16. Budžet nesigurnosti za umjernu točku -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	
<b>Saturation temperature</b>									
Measured saturation temperature	$t_{s, \text{meas}}$	-19.957	°C	0.001	K	normal (1 $\sigma$ )	1	[-]	0.0012
<b>Thermometer (Pt 100)</b>									
Calibration of PRT	$u(t_{s, \text{PRT cal}})$	0	mK	7.8	mK	normal (2 $\sigma$ )	1	[-]	0.0039
Long-term stability (drift) of PRT	$u(t_{s, \text{PRT drift}})$	0	mk	15.1	mK	rectangular	1	[-]	0.0087
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
<b>Resistance bridge(F700+EOFIX05)</b>									
RB Linearity	$u(t_{s, \text{Bridge cal}})$	0	ppm	2	ppm	normal (2 $\sigma$ )	0.000981253	°C/ppm@tS	0.0010
RB Resolution	$u(t_{s, \text{Bridge res}})$	0	ppm	1	ppm	rectangular	0.000981253	°C/ppm@tS	0.0003
RB AC/DC		0	ppm	2	ppm	rectangular	0.000981253	°C/ppm@tS	0.0011
RB internal insul leakage		0	mK	1	mK	normal (1 $\sigma$ )	1	[-]	0.0010
RS Calibration		99.99967	$\Omega$	0.4	ppm	normal (2 $\sigma$ )	0.000229613	°C/ppm@tS	0.0000
RS drift		0	$\Omega$	0.1	ppm	rectangular	0.000229613	°C/ppm@tS	0.0000
RS temperature stability	$u(t_{s, \text{Bridge drift}})$	0	$\Omega$	0.0002	m $\Omega$	rectangular	2.296132967	°C/ $\Omega$ @tS	0.0003
<b>Saturator</b>									
Saturator temp. gradients	$u(t_{s, \text{unit}})$	0	mK	10.4	mK	rectangular	1	[-]	0.0060
Saturator "efficiency"	$u(t_{s, \text{drift}})$	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
<b>Pressure in saturator</b>									
Measured saturation pressure	$u(P_{s, \text{meas}})$	1009.99	mbar	0.381	mbar	normal (1 $\sigma$ )	0.01	°C/mbar	0.0038
Calibration	$u(P_{s, \text{cal}})$	0	mbar	0.06	mbar	normal (2 $\sigma$ )	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
<b>Pressure at DUT</b>									
Measured pressure at DUT	$u(P_{d, \text{meas}})$	1009.61	mbar	0.369	mbar	normal (1 $\sigma$ )	0.01	°C/mbar	0.0037
Calibration	$u(P_{d, \text{cal}})$	0	mbar	0.06	mbar	normal (2 $\sigma$ )	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 $\Delta P = P_d - P_s$	$\Delta P$	-0.39	mbar						
Dew-point correction for $\Delta P$	$\Delta t_d$	-0.004	°C				0.01	°C/mbar	
<b>Hygrometer under calibration (DUT)</b>									
Measured dew-point temperature	$u(t_{\text{DUT meas}})$	-20.107	°C	0.025	K	normal (1 $\sigma$ )	1	[-]	0.0250
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	$t_d$	-19.961	°C			Combined uncertainty, $u(t_d)$			0.0403
	deviation	-0.147	°C			Coverage factor $k$			2
						Expanded uncertainty $U(t_d)$			0.0807

Tablica 17. Budžet nesigurnosti za umjernu točku -10 °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	
<b>Saturation temperature</b>									
Measured saturation temperature	$t_{s, \text{mea}}$	-10.003	°C	0.002	K	normal (1 $\sigma$ )	1	[-]	0.0018
<b>Thermometer (Pt 100)</b>									
Calibration of PRT	$u(t_{s, \text{PRT cal}})$	0	mK	8.5	mK	normal (2 $\sigma$ )	1	[-]	0.0042
Long-term stability (drift) of PRT	$u(t_{s, \text{PRT drift}})$	0	mk	15.1	mK	rectangular	1	[-]	0.0087
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
<b>Resistance bridge(F700+EOFIX05)</b>									
RB Linearity	$u(t_{s, \text{Bridge cal}})$	0	ppm	2	ppm	normal (2 $\sigma$ )	0.000984289	°C/ppm@tS	0.0010
RB Resolution	$u(t_{s, \text{Bridge res}})$	0	ppm	1	ppm	rectangular	0.000984289	°C/ppm@tS	0.0003
RB AC/DC		0	ppm	2	ppm	rectangular	0.000984289	°C/ppm@tS	0.0011
RB internal insul leakage		0	mK	1	mK	normal (1 $\sigma$ )	1	[-]	0.0010
RS Calibration		99.99967	$\Omega$	0.4	ppm	normal (2 $\sigma$ )	0.000240306	°C/ppm@tS	0.0000
RS drift		0	$\Omega$	0.1	ppm	rectangular	0.000240306	°C/ppm@tS	0.0000
RS temperature stability	$u(t_{s, \text{Bridge drift}})$	0	$\Omega$	0.0002	m $\Omega$	rectangular	2.403071945	°C/ $\Omega$ @tS	0.0003
<b>Saturator</b>									
Saturator temp. gradients	$u(t_{s, \text{unit}})$	0	mK	10.4	mK	rectangular	1	[-]	0.0060
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	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
<b>Pressure in saturator</b>									
Measured saturation pressure	$u(P_{s, \text{meas}})$	1005.80	mbar	0.477	mbar	normal (1 $\sigma$ )	0.011	°C/mbar	0.0052
Calibration	$u(P_{s, \text{cal}})$	0	mbar	0.06	mbar	normal (2 $\sigma$ )	0.011	°C/mbar	0.0003
Resolution	$u(P_{s, \text{res}})$	0	mbar	0.01	mbar	rectangular	0.011	°C/mbar	0.0000
Drift	$u(P_{s, \text{drift}})$	0	mbar	0.5	mbar	rectangular	0.011	°C/mbar	0.0032
Aerostatic head to sat. pressure monitor	$u(P_{s, \text{aero head}})$	0	mbar	0.06	mbar	rectangular	0.011	°C/mbar	0.0004
Stability of saturator pressure	$u(P_{s, \text{stability}})$	0	mbar	1	mbar	rectangular	0.011	°C/mbar	0.0064
<b>Pressure at DUT</b>									
Measured pressure at DUT	$u(P_{d, \text{meas}})$	1005.48	mbar	0.466	mbar	normal (1 $\sigma$ )	0.011	°C/mbar	0.0051
Calibration	$u(P_{d, \text{cal}})$	0	mbar	0.06	mbar	normal (2 $\sigma$ )	0.011	°C/mbar	0.0003
Resolution	$u(P_{d, \text{res}})$	0	mbar	0.01	mbar	rectangular	0.011	°C/mbar	0.0000
Drift	$u(P_{d, \text{drift}})$	0	mbar	0.5	mbar	rectangular	0.011	°C/mbar	0.0032
Aerostatic head to DUT pressure monitor	$u(P_{d, \text{aero head}})$	0	mbar	0.06	mbar	rectangular	0.011	°C/mbar	0.0004
Stability of DUT pressure	$u(P_{d, \text{stability}})$	0	mbar	1	mbar	rectangular	0.011	°C/mbar	0.0064
Pressure difference $\Delta P = P_d - P_s$	$\Delta P$	-0.32	mbar						
Dew-point correction for $\Delta P$	$\Delta t_d$	-0.003	°C				0.011	°C/mbar	
<b>Hygrometer under calibration (DUT)</b>									
Measured dew-point temperature	$u(t_{\text{DUT meas}})$	-10.066	°C	0.006	K	normal (1 $\sigma$ )	1	[-]	0.0056
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	$t_d$	-10.006	°C			Combined uncertainty, $u(t_d)$			0.0329
	deviation	-0.060	°C			Coverage factor $k$			2
						Expanded uncertainty $U(t_d)$			0.0658

Tablica 18. Budžet nesigurnosti za umjernu točku 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	
<b>Saturation temperature</b>									
Measured saturation temperature	$t_{s, \text{meas}}$	0.954	°C	0.001	K	normal (1 $\sigma$ )	1	[-]	0.0009
<b>Thermometer (Pt 100)</b>									
Calibration of PRT	$u(t_{s, \text{PRT cal}})$	0	mK	8.5	mK	normal (2 $\sigma$ )	1	[-]	0.0042
Long-term stability (drift) of PRT	$u(t_{s, \text{PRT drift}})$	0	mk	15.1	mK	rectangular	1	[-]	0.0087
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
<b>Resistance bridge(F700+EOFIX05)</b>									
RB Linearity	$u(t_{s, \text{Bridge cal}})$	0	ppm	2	ppm	normal (2 $\sigma$ )	0.000987584	°C/ppm@tS	0.0010
RB Resolution	$u(t_{s, \text{Bridge res}})$	0	ppm	1	ppm	rectangular	0.000987584	°C/ppm@tS	0.0003
RB AC/DC		0	ppm	2	ppm	rectangular	0.000987584	°C/ppm@tS	0.0011
RB internal insul leakage		0	mK	1	mK	normal (1 $\sigma$ )	1	[-]	0.0010
RS Calibration		99.99967	$\Omega$	0.4	ppm	normal (2 $\sigma$ )	0.000252101	°C/ppm@tS	0.0001
RS drift		0	$\Omega$	0.1	ppm	rectangular	0.000252101	°C/ppm@tS	0.0000
RS temperature stability	$u(t_{s, \text{Bridge drift}})$	0	$\Omega$	0.0002	m $\Omega$	rectangular	2.521020036	°C/ $\Omega$ @tS	0.0003
<b>Saturator</b>									
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
<b>Pressure in saturator</b>									
Measured saturation pressure	$u(P_{s, \text{meas}})$	998.4608	mbar	0.139	mbar	normal (1 $\sigma$ )	0.014	°C/mbar	0.0019
Calibration	$u(P_{s, \text{cal}})$	0	mbar	0.06	mbar	normal (2 $\sigma$ )	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
<b>Pressure at DUT</b>									
Measured pressure at DUT	$u(P_{d, \text{meas}})$	998.124	mbar	0.136	mbar	normal (1 $\sigma$ )	0.014	°C/mbar	0.0019
Calibration	$u(P_{d, \text{cal}})$	0	mbar	0.06	mbar	normal (2 $\sigma$ )	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 $\Delta P = P_d - P_s$	$\Delta P$	-0.34	mbar						
Dew-point correction for $\Delta P$	$\Delta t_d$	-0.005	°C				0.014	°C/mbar	
<b>Hygrometer under calibration (DUT)</b>									
Measured dew-point temperature	$u(t_{\text{DUT meas}})$	0.808	°C	0.002	K	normal (1 $\sigma$ )	1	[-]	0.0025
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	$t_d$	0.949	°C	Combined uncertainty, $u(t_d)$					0.0323
				Coverage factor $k$					2
				Expanded uncertainty $U(t_d)$					0.0645

Tablica 19. Budžet nesigurnosti za umjernu točku 10 °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	
<b>Saturation temperature</b>									
Measured saturation temperature	$t_{s, \text{meas}}$	9.961	°C	0.008	K	normal (1 $\sigma$ )	1	[-]	0.0083
<b>Thermometer (Pt 100)</b>									
Calibration of PRT	$u(t_{s, \text{PRT cal}})$	0	mK	8.5	mK	normal (2 $\sigma$ )	1	[-]	0.0042
Long-term stability (drift) of PRT	$u(t_{s, \text{PRT drift}})$	0	mk	10.6	mK	rectangular	1	[-]	0.0061
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
<b>Resistance bridge(F700+EOFIX05)</b>									
RB Linearity	$u(t_{s, \text{Bridge cal}})$	0	ppm	2	ppm	normal (2 $\sigma$ )	0.000990288	°C/ppm@tS	0.0010
RB Resolution	$u(t_{s, \text{Bridge res}})$	0	ppm	1	ppm	rectangular	0.000990288	°C/ppm@tS	0.0003
RB AC/DC		0	ppm	2	ppm	rectangular	0.000990288	°C/ppm@tS	0.0011
RB internal insul leakage		0	mK	1	mK	normal (1 $\sigma$ )	1	[-]	0.0010
RS Calibration		99.99967	$\Omega$	0.4	ppm	normal (2 $\sigma$ )	0.000261823	°C/ppm@tS	0.0001
RS drift		0	$\Omega$	0.1	ppm	rectangular	0.000261823	°C/ppm@tS	0.0000
RS temperature stability	$u(t_{s, \text{Bridge drift}})$	0	$\Omega$	0.0002	m $\Omega$	rectangular	2.618242348	°C/ $\Omega$ @tS	0.0003
<b>Saturator</b>									
Saturator temp. gradients	$u(t_{s, \text{unit}})$	0	mK	17	mK	rectangular	1	[-]	0.0098
Saturator "efficiency"	$u(t_{s, \text{eff}})$	0	mK	20	mK	rectangular	1	[-]	0.0115
Bath temperature gradients (uniformity)	$u(t_{s, \text{bath unit}})$	0	mK	8.9	mK	rectangular	1	[-]	0.0051
Stability of saturator temperature	$u(t_{s, \text{stability}})$	0	mK	7.8	mK	rectangular	1	[-]	0.0023
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, et		0	mK	30	mK	rectangular	1	[-]	0.0173
<b>Pressure in saturator</b>									
Measured saturation pressure	$u(P_{s, \text{meas}})$	1021.29	mbar	0.370	mbar	normal (1 $\sigma$ )	0.015	°C/mbar	0.0055
Calibration	$u(P_{s, \text{cal}})$	0	mbar	0.06	mbar	normal (2 $\sigma$ )	0.015	°C/mbar	0.0005
Resolution	$u(P_{s, \text{res}})$	0	mbar	0.01	mbar	rectangular	0.015	°C/mbar	0.0000
Drift	$u(P_{s, \text{drift}})$	0	mbar	0.5	mbar	rectangular	0.015	°C/mbar	0.0043
Aerostatic head to sat. pressure monitor	$u(P_{s, \text{aero head}})$	0.03	mbar	0.03	mbar	rectangular	0.015	°C/mbar	0.0003
Stability of saturator pressure	$u(P_{s, \text{stability}})$	0	mbar	1	mbar	rectangular	0.015	°C/mbar	0.0087
<b>Pressure at DUT</b>									
Measured pressure at DUT	$u(P_{d, \text{meas}})$	1020.58	mbar	0.354	mbar	normal (1 $\sigma$ )	0.015	°C/mbar	0.0053
Calibration	$u(P_{d, \text{cal}})$	0	mbar	0.06	mbar	normal (2 $\sigma$ )	0.015	°C/mbar	0.0005
Resolution	$u(P_{d, \text{res}})$	0	mbar	0.01	mbar	rectangular	0.015	°C/mbar	0.0000
Drift	$u(P_{d, \text{drift}})$	0	mbar	0.5	mbar	rectangular	0.015	°C/mbar	0.0043
Aerostatic head to DUT pressure monitor	$u(P_{d, \text{aero head}})$	0	mbar	0.03	mbar	rectangular	0.015	°C/mbar	0.0003
Stability of DUT pressure	$u(P_{d, \text{stability}})$	0	mbar	1	mbar	rectangular	0.015	°C/mbar	0.0087
Pressure difference $\Delta P = P_d - P_s$	$\Delta P$	-0.74	mbar						
Dew-point correction for $\Delta P$	$\Delta t_d$	-0.011	°C				0.015	°C/mbar	
<b>Hygrometer under calibration (DUT)</b>									
Measured dew-point temperature	$u(t_{\text{DUT meas}})$	9.811	°C	0.007	K	normal (1 $\sigma$ )	1	[-]	0.0073
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	$t_d$	9.950	°C			Combined uncertainty, $u(t_d)$			0.0321
						Coverage factor $k$			2
						Expanded uncertainty $U(t_d)$			0.0643

Tablica 20. Budžet nesigurnosti za umjernu točku 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	
<b>Saturation temperature</b>									
Measured saturation temperature	$t_{s, \text{meas}}$	19.927	°C	0.006	K	normal (1 $\sigma$ )	1	[-]	0.0064
<b>Thermometer (Pt 100)</b>									
Calibration of PRT	$u(t_{s, \text{PRT cal}})$	0	mK	8.5	mK	normal (2 $\sigma$ )	1	[-]	0.0042
Long-term stability (drift) of PRT	$u(t_{s, \text{PRT drift}})$	0	mk	10.6	mK	rectangular	1	[-]	0.0061
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
<b>Resistance bridge(F700+EOFIX05)</b>									
RB Linearity	$u(t_{s, \text{Bridge cal}})$	0	ppm	2	ppm	normal (2 $\sigma$ )	0.000993298	°C/ppm@tS	0.0010
RB Resolution	$u(t_{s, \text{Bridge res}})$	0	ppm	1	ppm	rectangular	0.000993298	°C/ppm@tS	0.0003
RB AC/DC		0	ppm	2	ppm	rectangular	0.000993298	°C/ppm@tS	0.0011
RB internal insul leakage		0	mK	1	mK	normal (1 $\sigma$ )	1	[-]	0.0010
RS Calibration		99.99967	$\Omega$	0.4	ppm	normal (2 $\sigma$ )	0.000272615	°C/ppm@tS	0.0001
RS drift		0	$\Omega$	0.1	ppm	rectangular	0.000272615	°C/ppm@tS	0.0000
RS temperature stability	$u(t_{s, \text{Bridge drift}})$	0	$\Omega$	0.0002	m $\Omega$	rectangular	2.726154358	°C/ $\Omega$ @tS	0.0003
<b>Saturator</b>									
Saturator temp. gradients	$u(t_{s, \text{unit}})$	0	mK	17	mK	rectangular	1	[-]	0.0098
Saturator "efficiency"	$u(t_{s, \text{eff}})$	0	mK	20	mK	rectangular	1	[-]	0.0115
Bath temperature gradients (uniformity)	$u(t_{s, \text{bath unit}})$	0	mK	8.9	mK	rectangular	1	[-]	0.0051
Stability of saturator temperature	$u(t_{s, \text{stability}})$	0	mK	7.8	mK	rectangular	1	[-]	0.0023
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, et		0	mK	30	mK	rectangular	1	[-]	0.0173
<b>Pressure in saturator</b>									
Measured saturation pressure	$u(P_{s, \text{meas}})$	1020.49	mbar	0.346	mbar	normal (1 $\sigma$ )	0.016	°C/mbar	0.0055
Calibration	$u(P_{s, \text{cal}})$	0	mbar	0.06	mbar	normal (2 $\sigma$ )	0.016	°C/mbar	0.0005
Resolution	$u(P_{s, \text{res}})$	0	mbar	0.01	mbar	rectangular	0.016	°C/mbar	0.0000
Drift	$u(P_{s, \text{drift}})$	0	mbar	0.5	mbar	rectangular	0.016	°C/mbar	0.0046
Aerostatic head to sat. pressure monitor	$u(P_{s, \text{aero head}})$	0.03	mbar	0.03	mbar	rectangular	0.016	°C/mbar	0.0003
Stability of saturator pressure	$u(P_{s, \text{stability}})$	0	mbar	1	mbar	rectangular	0.016	°C/mbar	0.0092
<b>Pressure at DUT</b>									
Measured pressure at DUT	$u(P_{d, \text{meas}})$	1019.75	mbar	0.326	mbar	normal (1 $\sigma$ )	0.016	°C/mbar	0.0052
Calibration	$u(P_{d, \text{cal}})$	0	mbar	0.06	mbar	normal (2 $\sigma$ )	0.016	°C/mbar	0.0005
Resolution	$u(P_{d, \text{res}})$	0	mbar	0.01	mbar	rectangular	0.016	°C/mbar	0.0000
Drift	$u(P_{d, \text{drift}})$	0	mbar	0.5	mbar	rectangular	0.016	°C/mbar	0.0046
Aerostatic head to DUT pressure monitor	$u(P_{d, \text{aero head}})$	0	mbar	0.03	mbar	rectangular	0.016	°C/mbar	0.0003
Stability of DUT pressure	$u(P_{d, \text{stability}})$	0	mbar	1	mbar	rectangular	0.016	°C/mbar	0.0092
Pressure difference $\Delta P = P_d - P_s$	$\Delta P$	-0.77	mbar						
Dew-point correction for $\Delta P$	$\Delta t_d$	-0.012	°C				0.016	°C/mbar	
<b>Hygrometer under calibration (DUT)</b>									
Measured dew-point temperature	$u(t_{\text{DUT meas}})$	19.795	°C	0.005	K	normal (1 $\sigma$ )	1	[-]	0.0045
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	$t_d$	19.915	°C			Combined uncertainty, $u(t_d)$			0.0315
						Coverage factor $k$			2
						Expanded uncertainty $U(t_d)$			0.0631



Tablica 21. Budžet nesigurnosti za umjernu točku 30 °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	
<b>Saturation temperature</b>									
Measured saturation temperature	$t_{s, \text{meas}}$	29.899	°C	0.003	K	normal (1 $\sigma$ )	1	[-]	0.0025
<b>Thermometer (Pt 100)</b>									
Calibration of PRT	$u(t_{s, \text{PRT cal}})$	0	mK	8.5	mK	normal (2 $\sigma$ )	1	[-]	0.0042
Long-term stability (drift) of PRT	$u(t_{s, \text{PRT drift}})$	0	mk	10.6	mK	rectangular	1	[-]	0.0061
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
<b>Resistance bridge(F700+EOFIX05)</b>									
RB Linearity	$u(t_{s, \text{Bridge cal}})$	0	ppm	2	ppm	normal (2 $\sigma$ )	0.000996328	°C/ppm@tS	0.0010
RB Resolution	$u(t_{s, \text{Bridge res}})$	0	ppm	1	ppm	rectangular	0.000996328	°C/ppm@tS	0.0003
RB AC/DC		0	ppm	2	ppm	rectangular	0.000996328	°C/ppm@tS	0.0012
RB internal insul leakage		0	mK	1	mK	normal (1 $\sigma$ )	1	[-]	0.0010
RS Calibration		99.99967	$\Omega$	0.4	ppm	normal (2 $\sigma$ )	0.000283447	°C/ppm@tS	0.0001
RS drift		0	$\Omega$	0.1	ppm	rectangular	0.000283447	°C/ppm@tS	0.0000
RS temperature stability	$u(t_{s, \text{Bridge drift}})$	0	$\Omega$	0.0002	m $\Omega$	rectangular	2.83448369	°C/ $\Omega$ @tS	0.0003
<b>Saturator</b>									
Saturator temp. gradients	$u(t_{s, \text{unit}})$	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)	$u(t_{s, \text{bath unit}})$	0	mK	6.7	mK	rectangular	1	[-]	0.0039
Stability of saturator temperature	$u(t_{s, \text{stability}})$	0	mK	8	mK	rectangular	1	[-]	0.0023
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, et		0	mK	30	mK	rectangular	1	[-]	0.0173
<b>Pressure in saturator</b>									
Measured saturation pressure	$u(P_{s, \text{meas}})$	1016.55	mbar	0.282	mbar	normal (1 $\sigma$ )	0.017	°C/mbar	0.0048
Calibration	$u(P_{s, \text{cal}})$	0	mbar	0.06	mbar	normal (2 $\sigma$ )	0.017	°C/mbar	0.0005
Resolution	$u(P_{s, \text{res}})$	0	mbar	0.01	mbar	rectangular	0.017	°C/mbar	0.0000
Drift	$u(P_{s, \text{drift}})$	0	mbar	0.5	mbar	rectangular	0.017	°C/mbar	0.0049
Aerostatic head to sat. pressure monitor	$u(P_{s, \text{aero head}})$	0.03	mbar	0.03	mbar	rectangular	0.017	°C/mbar	0.0003
Stability of saturator pressure	$u(P_{s, \text{stability}})$	0	mbar	1	mbar	rectangular	0.017	°C/mbar	0.0098
<b>Pressure at DUT</b>									
Measured pressure at DUT	$u(P_{d, \text{meas}})$	1015.75	mbar	0.264	mbar	normal (1 $\sigma$ )	0.017	°C/mbar	0.0045
Calibration	$u(P_{d, \text{cal}})$	0	mbar	0.06	mbar	normal (2 $\sigma$ )	0.017	°C/mbar	0.0005
Resolution	$u(P_{d, \text{res}})$	0	mbar	0.01	mbar	rectangular	0.017	°C/mbar	0.0000
Drift	$u(P_{d, \text{drift}})$	0	mbar	0.5	mbar	rectangular	0.017	°C/mbar	0.0049
Aerostatic head to DUT pressure monitor	$u(P_{d, \text{aero head}})$	0	mbar	0.03	mbar	rectangular	0.017	°C/mbar	0.0003
Stability of DUT pressure	$u(P_{d, \text{stability}})$	0	mbar	1	mbar	rectangular	0.017	°C/mbar	0.0098
Pressure difference $\Delta P = P_d - P_s$	$\Delta P$	-0.83	mbar						
Dew-point correction for $\Delta P$	$\Delta t_d$	-0.014	°C				0.017	°C/mbar	
<b>Hygrometer under calibration (DUT)</b>									
Measured dew-point temperature	$u(t_{\text{DUT meas}})$	29.772	°C	0.007	K	normal (1 $\sigma$ )	1	[-]	0.0069
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	$t_d$	29.885	°C			Combined uncertainty, $u(t_d)$			0.0326
						Coverage factor $k$			2
						Expanded uncertainty $U(t_d)$			0.0652

Tablica 22. Budžet nesigurnosti za umjernu točku 40 °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	
<b>Saturation temperature</b>									
Measured saturation temperature	$t_{s, \text{meas}}$	39.860	°C	0.002	K	normal (1 $\sigma$ )	1	[-]	0.0024
<b>Thermometer (Pt 100)</b>									
Calibration of PRT	$u(t_{s, \text{PRT cal}})$	0	mK	8.5	mK	normal (2 $\sigma$ )	1	[-]	0.0042
Long-term stability (drift) of PRT	$u(t_{s, \text{PRT drift}})$	0	mk	10.6	mK	rectangular	1	[-]	0.0061
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
<b>Resistance bridge(F700+EOFIX05)</b>									
RB Linearity	$u(t_{s, \text{Bridge cal}})$	0	ppm	2	ppm	normal (2 $\sigma$ )	0.000999372	°C/ppm@tS	0.0010
RB Resolution	$u(t_{s, \text{Bridge res}})$	0	ppm	1	ppm	rectangular	0.000999372	°C/ppm@tS	0.0003
RB AC/DC		0	ppm	2	ppm	rectangular	0.000999372	°C/ppm@tS	0.0012
RB internal insul leakage		0	mK	1	mK	normal (1 $\sigma$ )	1	[-]	0.0010
RS Calibration		99.99967	$\Omega$	0.4	ppm	normal (2 $\sigma$ )	0.000294304	°C/ppm@tS	0.0001
RS drift		0	$\Omega$	0.1	ppm	rectangular	0.000294304	°C/ppm@tS	0.0000
RS temperature stability	$u(t_{s, \text{Bridge drift}})$	0	$\Omega$	0.0002	m $\Omega$	rectangular	2.943047173	°C/ $\Omega$ @tS	0.0003
<b>Saturator</b>									
Saturator temp. gradients	$u(t_{s, \text{unit}})$	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)	$u(t_{s, \text{bath unit}})$	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, et		0	mK	30	mK	rectangular	1	[-]	0.0173
<b>Pressure in saturator</b>									
Measured saturation pressure	$u(P_{s, \text{meas}})$	1015.78	mbar	0.314	mbar	normal (1 $\sigma$ )	0.018	°C/mbar	0.0056
Calibration	$u(P_{s, \text{cal}})$	0	mbar	0.06	mbar	normal (2 $\sigma$ )	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
<b>Pressure at DUT</b>									
Measured pressure at DUT	$u(P_{d, \text{meas}})$	1014.87	mbar	0.292	mbar	normal (1 $\sigma$ )	0.018	°C/mbar	0.0053
Calibration	$u(P_{d, \text{cal}})$	0	mbar	0.06	mbar	normal (2 $\sigma$ )	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 $\Delta P = P_d - P_s$	$\Delta P$	-0.94	mbar						
Dew-point correction for $\Delta P$	$\Delta t_d$	-0.017	°C				0.018	°C/mbar	
<b>Hygrometer under calibration (DUT)</b>									
Measured dew-point temperature	$u(t_{\text{DUT meas}})$	39.741	°C	0.006	K	normal (1 $\sigma$ )	1	[-]	0.0056
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	$t_d$	39.843	°C			Combined uncertainty, $u(t_d)$			0.0332
						Coverage factor $k$			2
						Expanded uncertainty $U(t_d)$			0.0664

Tablica 23. Budžet nesigurnosti za umjernu točku 50 °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	
<b>Saturation temperature</b>									
Measured saturation temperature	$t_{s, \text{meas}}$	49.845	°C	0.001	K	normal (1 $\sigma$ )	1	[-]	0.0015
<b>Thermometer (Pt 100)</b>									
Calibration of PRT	$u(t_{s, \text{PRT cal}})$	0	mK	8.5	mK	normal (2 $\sigma$ )	1	[-]	0.0042
Long-term stability (drift) of PRT	$u(t_{s, \text{PRT drift}})$	0	mk	10.6	mK	rectangular	1	[-]	0.0061
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
<b>Resistance bridge(F700+EOFIX05)</b>									
RB Linearity	$u(t_{s, \text{Bridge cal}})$	0	ppm	2	ppm	normal (2 $\sigma$ )	0.001002443	°C/ppm@tS	0.0010
RB Resolution	$u(t_{s, \text{Bridge res}})$	0	ppm	1	ppm	rectangular	0.001002443	°C/ppm@tS	0.0003
RB AC/DC		0	ppm	2	ppm	rectangular	0.001002443	°C/ppm@tS	0.0012
RB internal insul leakage		0	mK	1	mK	normal (1 $\sigma$ )	1	[-]	0.0010
RS Calibration		99.99967	$\Omega$	0.4	ppm	normal (2 $\sigma$ )	0.000305222	°C/ppm@tS	0.0001
RS drift		0	$\Omega$	0.1	ppm	rectangular	0.000305222	°C/ppm@tS	0.0000
RS temperature stability	$u(t_{s, \text{Bridge drift}})$	0	$\Omega$	0.0002	m $\Omega$	rectangular	3.05223324	°C/ $\Omega$ @tS	0.0004
<b>Saturator</b>									
Saturator temp. gradients	$u(t_{s, \text{unit}})$	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)	$u(t_{s, \text{bath unit}})$	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, et		0	mK	30	mK	rectangular	1	[-]	0.0173
<b>Pressure in saturator</b>									
Measured saturation pressure	$u(P_{s, \text{meas}})$	1002.64	mbar	0.146	mbar	normal (1 $\sigma$ )	0.02	°C/mbar	0.0029
Calibration	$u(P_{s, \text{cal}})$	0	mbar	0.06	mbar	normal (2 $\sigma$ )	0.02	°C/mbar	0.0006
Resolution	$u(P_{s, \text{res}})$	0	mbar	0.01	mbar	rectangular	0.02	°C/mbar	0.0001
Drift	$u(P_{s, \text{drift}})$	0	mbar	0.5	mbar	rectangular	0.02	°C/mbar	0.0058
Aerostatic head to sat. pressure monitor	$u(P_{s, \text{aero head}})$	0.03	mbar	0.03	mbar	rectangular	0.02	°C/mbar	0.0003
Stability of saturator pressure	$u(P_{s, \text{stability}})$	0	mbar	1	mbar	rectangular	0.02	°C/mbar	0.0115
<b>Pressure at DUT</b>									
Measured pressure at DUT	$u(P_{d, \text{meas}})$	1001.58	mbar	0.123	mbar	normal (1 $\sigma$ )	0.02	°C/mbar	0.0025
Calibration	$u(P_{d, \text{cal}})$	0	mbar	0.06	mbar	normal (2 $\sigma$ )	0.02	°C/mbar	0.0006
Resolution	$u(P_{d, \text{res}})$	0	mbar	0.01	mbar	rectangular	0.02	°C/mbar	0.0001
Drift	$u(P_{d, \text{drift}})$	0	mbar	0.5	mbar	rectangular	0.02	°C/mbar	0.0058
Aerostatic head to DUT pressure monitor	$u(P_{d, \text{aero head}})$	0	mbar	0.03	mbar	rectangular	0.02	°C/mbar	0.0003
Stability of DUT pressure	$u(P_{d, \text{stability}})$	0	mbar	1	mbar	rectangular	0.02	°C/mbar	0.0115
Pressure difference $\Delta P = P_d - P_s$	$\Delta P$	-1.08	mbar						
Dew-point correction for $\Delta P$	$\Delta t_d$	-0.022	°C				0.02	°C/mbar	
<b>Hygrometer under calibration (DUT)</b>									
Measured dew-point temperature	$u(t_{\text{DUT meas}})$	49.713	°C	0.007	K	normal (1 $\sigma$ )	1	[-]	0.0069
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	$t_d$	49.823	°C				Combined uncertainty, $u(t_d)$		0.0337
							Coverage factor $k$		2
							Expanded uncertainty $U(t_d)$		0.0674

Tablica 24. Budžet nesigurnosti za umjernu točku 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	
<b>Saturation temperature</b>									
Measured saturation temperature	$t_{s, \text{meas}}$	58.819	°C	0.003	K	normal (1 $\sigma$ )	1	[-]	0.0032
<b>Thermometer (Pt 100)</b>									
Calibration of PRT	$u(t_{s, \text{PRT cal}})$	0	mK	8.5	mK	normal (2 $\sigma$ )	1	[-]	0.0042
Long-term stability (drift) of PRT	$u(t_{s, \text{PRT drift}})$	0	mk	10.6	mK	rectangular	1	[-]	0.0061
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
<b>Resistance bridge(F700+EOFIX05)</b>									
RB Linearity	$u(t_{s, \text{Bridge cal}})$	0	ppm	2	ppm	normal (2 $\sigma$ )	0.00100522	°C/ppm@tS	0.0010
RB Resolution	$u(t_{s, \text{Bridge res}})$	0	ppm	1	ppm	rectangular	0.00100522	°C/ppm@tS	0.0003
RB AC/DC		0	ppm	2	ppm	rectangular	0.00100522	°C/ppm@tS	0.0012
RB internal insul leakage		0	mK	1	mK	normal (1 $\sigma$ )	1	[-]	0.0010
RS Calibration		99.99967	$\Omega$	0.4	ppm	normal (2 $\sigma$ )	0.000315067	°C/ppm@tS	0.0001
RS drift		0	$\Omega$	0.1	ppm	rectangular	0.000315067	°C/ppm@tS	0.0000
RS temperature stability	$u(t_{s, \text{Bridge drift}})$	0	$\Omega$	0.0002	m $\Omega$	rectangular	3.150682044	°C/ $\Omega$ @tS	0.0004
<b>Saturator</b>									
Saturator temp. gradients	$u(t_{s, \text{unit}})$	0	mK	55	mK	rectangular	1	[-]	0.0318
Saturator "efficiency"	$u(t_{s, \text{eff}})$	0	mK	30	mK	rectangular	1	[-]	0.0173
Bath temperature gradients (uniformity)	$u(t_{s, \text{bath unit}})$	0	mK	10.3	mK	rectangular	1	[-]	0.0059
Stability of saturator temperature	$u(t_{s, \text{stability}})$	0	mK	14	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, et		0	mK	30	mK	rectangular	1	[-]	0.0173
<b>Pressure in saturator</b>									
Measured saturation pressure	$u(P_{s, \text{meas}})$	1001.85	mbar	0.257	mbar	normal (1 $\sigma$ )	0.021	°C/mbar	0.0054
Calibration	$u(P_{s, \text{cal}})$	0	mbar	0.06	mbar	normal (2 $\sigma$ )	0.021	°C/mbar	0.0006
Resolution	$u(P_{s, \text{res}})$	0	mbar	0.01	mbar	rectangular	0.021	°C/mbar	0.0001
Drift	$u(P_{s, \text{drift}})$	0	mbar	0.5	mbar	rectangular	0.021	°C/mbar	0.0061
Aerostatic head to sat. pressure monitor	$u(P_{s, \text{aero head}})$	0.03	mbar	0.03	mbar	rectangular	0.021	°C/mbar	0.0004
Stability of saturator pressure	$u(P_{s, \text{stability}})$	0	mbar	1	mbar	rectangular	0.021	°C/mbar	0.0121
<b>Pressure at DUT</b>									
Measured pressure at DUT	$u(P_{d, \text{meas}})$	1000.64	mbar	0.241	mbar	normal (1 $\sigma$ )	0.021	°C/mbar	0.0051
Calibration	$u(P_{d, \text{cal}})$	0	mbar	0.06	mbar	normal (2 $\sigma$ )	0.021	°C/mbar	0.0006
Resolution	$u(P_{d, \text{res}})$	0	mbar	0.01	mbar	rectangular	0.021	°C/mbar	0.0001
Drift	$u(P_{d, \text{drift}})$	0	mbar	0.5	mbar	rectangular	0.021	°C/mbar	0.0061
Aerostatic head to DUT pressure monitor	$u(P_{d, \text{aero head}})$	0	mbar	0.03	mbar	rectangular	0.021	°C/mbar	0.0004
Stability of DUT pressure	$u(P_{d, \text{stability}})$	0	mbar	1	mbar	rectangular	0.021	°C/mbar	0.0121
Pressure difference $\Delta P = P_d - P_s$	$\Delta P$	-1.24	mbar						
Dew-point correction for $\Delta P$	$\Delta t_d$	-0.026	°C				0.021	°C/mbar	
<b>Hygrometer under calibration (DUT)</b>									
Measured dew-point temperature	$u(t_{\text{DUT meas}})$	58.791	°C	0.010	K	normal (1 $\sigma$ )	1	[-]	0.0095
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	$t_d$	58.793	°C			Combined uncertainty, $u(t_d)$			0.0478
						Coverage factor $k$			2
						Expanded uncertainty $U(t_d)$			0.0956

## 9. ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada provedeno je umjeravanje etalonskog mjerila injišta i rosišta zraka. Unutar Laboratorija za procesna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu je provedeno umjeravanje higrometra točke rose General Eastern. Kao kontrolni higrometar je korišten higrometar točke rose MBW 373 LHX. Umjeravanje je provedeno u deset umjernih točaka:  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  ;  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ;  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ;  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  ;  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ;  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ;  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  ;  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ;  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Budući da je tijekom umjeravanje obuhvaćen širok raspon injišta i rosišta, za umjeravanje su korištene dvije različite mjerne linije. Obje mjerne linije su sastavljene korištenjem postojećih uređaja i pomoćne opreme koja je na raspolaganju u FSB-LPM-u. Za jednu mjernu liniju je korišten niskotemperaturni saturator LRS koji omogućuje rad u temperaturnom području od  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , dok je za drugu mjernu liniju korišten viskotemperaturni saturator HRS koji omogućuje rad u temperaturnom području od  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Oba saturatora čine osnovu primarnog generatora zraka poznatog injišta i rosišta. U radu su dane teorijske osnove vezane uz princip rada primarnih generatora zraka poznatog injišta/rosišta. Također je prikazana i detaljno opisana sva korištena oprema i uređaji za vrijeme provedbe postupka umjeravanja. Umjeravanje je trajalo deset dana, tijekom kojih je bilo potrebno ponoviti neka mjerenja kako bi rezultati u svim umjeranim točkama bili zadovoljavajući. Rezultati umjeravanja u pojedinačnim umjernim točkama su zabilježeni pomoću računalnih programa koji su izrađeni u programskom sučelju „Lab View“. Ovi rezultati su dodatno obrađeni i prikazani pomoću tablica i dijagrama u radu. Umjeravanjem je utvrđeno da se potrebne korekcije očitavanja umjeravanog instrumenta, u cijelom mjernom području, kreću u granicama od  $-0.147\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $0.011\text{ }^{\circ}\text{C}$ . U tablicama i dijagramima su prikazana odstupanja i proširene mjerne nesigurnosti umjeravanog higrometra točke rose. Za svaku umjernu točku injišta i rosišta napravljen je budžet nesigurnosti. U njemu su navedene sve mjerne nesigurnosti koje su uzete u obzir prilikom umjeravanja mjerila injišta i rosišta zraka. Na kraju je izračunata proširena mjerna nesigurnost koja korisniku umjeravanog instrumenta daje važnu informaciju o kvaliteti dobivenog rezultata. Proširena mjerna nesigurnost je dobivena množenjem kombinirane mjerne nesigurnosti faktorom pokrivanja  $k=2$ , što znači da se stvarna vrijednost mjerene veličine nalazi unutar određenog intervala uz pouzdanost od približno 95 %. Umjeravanja su provedena s proširenim nesigurnostima između 70 mK i 96 mK (na razini pouzdanosti od 95 %). Na temelju rezultata umjeravanja zaključeno je da je instrument i dalje moguće koristiti kao etalonsko mjerilo za umjeravanje mjerila relativne vlažnosti zraka.

## LITERATURA

1. Zvizdić, D., Heinonen, M., Šestan, D.: New Primary Dew-Point Generators at HMI/FSB-LPM in the Range from  $-70^{\circ}\text{C}$  to  $+60^{\circ}\text{C}$ , 2012
2. Galović, A.: *Termodinamika II*, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
3. Šestan, D., Grgc Bermanec L., Matas I.: *Podloge za predavanja „Mjerenja u energetici“*, Zagreb, 2022.
4. Šestan, D.: *Doktorski rad „Nova metoda za realizaciju ljestvice injišta/rosišta zraka u temperaturnom području od  $-70^{\circ}\text{C}$  do  $5^{\circ}\text{C}$ “*, Zagreb, 2015.
5. <https://hr.wikipedia.org/wiki/Rosi%C5%A1te> 10.11.2022.
6. <https://hrcak.srce.hr/file/386462> 14.11.2022.
7. LPM-FSB, Calibration of dew-point hygrometers, CPVL01, 2009
8. LPM-FSB, Calibration of relative humidity meters, CP-VL02, 2019
9. General Eastern instruments, Humidity handbook, Woburn, 1993.
10. [https://www.mbw.ch/wp-content/uploads/2020/08/MBW\\_373\\_Datasheet\\_EN\\_V3.0-1.pdf](https://www.mbw.ch/wp-content/uploads/2020/08/MBW_373_Datasheet_EN_V3.0-1.pdf) 13.12.2022.
11. <http://inko.hr/datoteke/1000055.pdf>
12. Heinonen M., keskus M.: Uncertainty in humidity measurements, Publication of the EUROMET Workshop P758, Espoo, 2006.
13. Runje, B.: *Predavanje iz kolegija mjeriteljstvo*, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
14. Hlušička, A.: *Ispitivanje etalonskih mjerila vlažnosti (završni rad)*, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
15. Šestan, D., Grgc Bermanec L., Matas I.: *Podloge za predavanja „Mjerna nesigurnost“*, Zagreb, 2022.