

# Umjeravanje mjerila relativne vlažnosti

---

**Krtolačić, Josip**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:662176>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-23**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Josip Krtolačić**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# UMJERAVANJE MJERILA RELATIVNE VLAŽNOSTI

Mentori:

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

Student:

Josip Krtolačić

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se voditelju rada profesoru Danijelu Šestanu na stručnim savjetima i pomoći tijekom izrade završnog rada, te asistentu Ivanu Matasu na iskazanoj pomoći i vođenju kroz praktični dio rada te na savjetima za izradu i iskazivanje dobivenih rezultata u radu.

Josip Krtolačić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



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

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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Josip Krtolačić** Mat. br.: **0035204483**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Umjeravanje mjerila relativne vlažnosti**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Calibration of relative humidity meters**

Opis zadatka:

Potrebno je razraditi teorijske osnove i definirati postupak umjeravanja higrometara relativne vlažnosti zraka.

U radu je potrebno:

- Dati opis teorijskih osnova, smjernica i primijenjenih jednadžbi za relativnu vlažnost zraka.
- Opisati principe rada etalona i mjerila.
- Opisati metode i postupak umjeravanja.
- Procijeniti glavne sastavnice nesigurnosti umjeravanja.
- Provesti umjeravanje higrometra relativne vlažnosti zraka koristeći mjernu liniju i opremu u Laboratoriju za procesna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.
- Priložiti rezultate umjeravanja s procijenjenim pojedinačnim sastavnicama koje doprinose ukupnoj nesigurnosti provedenog umjeravanja.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

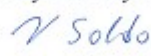
Zadatak zadan:  
30. studenoga 2020.

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

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

Zadatak zadao:

  
 Doc. dr. sc. Danijel Šestan

Predsjednik Povjerenstva:  
  
 Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

## Sadržaj

POPIS SLIKA .....	8
POPIS TABLICA.....	9
POPIS OZNAKA .....	10
SAŽETAK.....	11
SUMMARY .....	12
1. UVOD .....	13
2. TERMODINAMIČKE OSNOVE RELATIVNE VLAŽNOSTI.....	14
2.1. Jednofazni i višefazni sustavi .....	14
2.2. Vlažnost zraka (plina).....	14
2.3. Idealni plin .....	14
2.4. Tlak vodene pare .....	14
2.5. Tlak zasićenja čiste tvari.....	14
2.6. Realni plin.....	15
2.7. Parcijalni tlak vodene pare .....	16
2.8. Tlak zasićenja u mješavini plinova.....	16
2.9. Temperatura točke ledišta i temperatura točke rosišta .....	16
2.10. Relativna vlažnost.....	16
3. ETALONI .....	19
3.1. Dvotlačno/dvotemperaturni generatori vlage .....	19
3.2. Dvotlačni generator vlage.....	21
3.3. Higrometar točke rosišta.....	22
3.4. Psihrometar .....	23
3.4.1 Princip rada .....	23
3.4.2. Uvjeti i umjeravanje .....	25
3.5. Senzori relativne vlažnosti.....	25
3.6. Otopine soli.....	26

4. METODE UMJERAVANJA.....	28
5. SEKVENCE UMJERAVANJA PRI ODREĐENOJ TEMPERATURI.....	29
5.1. Sekvenca A1 .....	29
5.2. Sekvenca A2 .....	29
5.3. Sekvenca B1 .....	30
5.4. Sekvenca B2 .....	31
5.5. Sekvenca C1 .....	31
5.6. Sekvenca C2 .....	32
5.7. Sekvenca D .....	32
6. VRIJEME URAVNOTEŽENJA .....	33
7. CERTIFIKAT O UMJERAVANJU .....	35
8. MJERNA NESIGURNOST I UTJECJNI FAKTORI .....	36
8.1. Normalna i Studentova raspodjela.....	36
8.2. Procjene nesigurnosti tipa A.....	38
8.3. Procjene nesigurnosti tipa B .....	38
8.4. Koeficijenti osjetljivosti .....	39
9. PRAKTIČNI DIO RADA – UMJERAVANJE MJERILA ZA POTREBE INDUSTRIJE	
41	
9.1. Uvod .....	41
9.2. Proračun mjerne nesigurnosti umjeravanog uređaja.....	42
9.3. Nesigurnost zbog mjerenja temperature rosišta.....	43
9.4. Nesigurnost uzrokovana umjeravanim uređajem .....	43
9.5. Ponovljivost.....	43
9.6. Rezolucija .....	43
9.7. Histereza .....	44
9.8. Nesigurnost zbog ostalih utjecaja i rezultat .....	44
10. ZAKLJUČAK .....	46

LITERATURA..... 47



**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Kvalitativni $\vartheta$ -p dijagram za vodu [2].....	15
Slika 2.	Mollierov dijagram .....	17
Slika 3.	Shema dvotlačno/dvotemperaturnog generatora vlage .....	21
Slika 4.	Shema dvotlačnog generatora vlage .....	22
Slika 5.	Peltierov (termoelektrični) efekt .....	22
Slika 6.	Shema psihrometra.....	24
Slika 7.	Dijagram zasićenja soli u ovisnosti o temperaturi smjese .....	27
Slika 8.	Dijagram promjene relativne vlažnosti umjeravanjem po sekvenci A1 .....	29
Slika 9.	Dijagram promjene relativne vlažnosti umjeravanjem po sekvenci A2 .....	30
Slika 10.	Dijagram promjene relativne vlažnosti umjeravanjem po sekvenci B1 .....	30
Slika 11.	Dijagram promjene relativne vlažnosti umjeravanjem po sekvenci B2.....	31
Slika 12.	Dijagram promjene relativne vlažnosti umjeravanjem po sekvenci C1 .....	32
Slika 13.	Dijagram promjene relativne vlažnosti umjeravanjem po sekvenci C2.....	32
Slika 14.	Stabilizacija relativne vlažnosti.....	33
Slika 15.	Normalna raspodjela .....	37
Slika 16.	T-raspodjela u odnosu na pripadajuću normalnu raspodjelu .....	38
Slika 17	Često korištene kontinuirane statističke raspodjele .....	39

**POPIS TABLICA**

Tablica 1 - Rezultati mjerenja .....	42
Tablica 2 Tablica ponovljivosti za točku (23 °C, 55 %RV).....	43
Tablica 3 Tablica histereze za točku (40 °C, 70 %) .....	44
Tablica 4 Odstupanje i mjerna nesigurnost .....	44

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$e$	Pa	Tlak vodene pare
$e^{\wedge}$	Pa	Parcijalni tlak vodene pare
$e^{\wedge}_i$	Pa	Parcijalni tlak vodene pare iznad ledene površine
$e^{\wedge}_w$	Pa	Parcijalni tlak vodene pare iznad vodene površine
$e^{\wedge}_C$	Pa	Parcijalni tlak vodene pare u klima komori
$e^{\wedge}_M$	Pa	Parcijalni tlak vodene pare iznad zrcalne površine
$f_i$	1	Faktor poboljšanja za led
$f_w$	1	Faktor poboljšanja za vodu
$h$	1	Relativna vlažnost
$T$ ili $t$	K ili °C	Temperatura zraka
$T_d$ ili $t_d$	K ili °C	Temperatura točke rosišta
$T_f$ ili $t_f$	K ili °C	Temperatura točke ledišta
$T_i$ ili $t_i$	K ili °C	Temperatura vlažnog termometra iznad ledene površine
$T_w$ ili $t_w$	K ili °C	Temperatura vlažnog termometra iznad vodene površine
$T_C$ ili $t_C$	K ili °C	Temperatura klima komore
$T_s$ ili $t_s$	K ili °C	Temperatura zasićivača
$p$	hPa	Tlak plina
$p_C$	hPa	Tlak plina u kalibracijskoj komori
$p_s$	hPa	Tlak plina u zasićivaču
$p_M$	hPa	Tlak plina iznad zrcala
$\delta U_{rep}$	1	Ponovljivost relativne vlažnosti
$\delta T$	K	Ponovljivost temperature plina
$\delta T_d$	K	Ponovljivost temperature rosišta

## **SAŽETAK**

U ovom radu opisuje se i pokušava se standardizirati postupak umjeravanja mjerila relativne vlažnosti. Objasnjene su termodinamičke osnove idealnog plina, realnog plina i vlažnog zraka. Prikazan je princip rada i način korištenja generatora vlage i usporednih etalona. Opisane su metode umjeravanja, kako smanjiti nesigurnosti te kako pravilno rukovati mjernim uređajem i zaštititi ga od oštećenja. Navedeno je što treba sadržavati i kako treba izgledati certifikat o umjeravanju i kako proračunati mjerne nesigurnosti. Na kraju rada opisan je postupak umjeravanja jednog uređaja za potrebe industrije na čijem se primjeru pokazala primjena teorijski obrađenih osnova iz prve polovice rada.

Ključne riječi: mjerenje vlažnosti, vlažni zrak, umjeravanje, mjerna nesigurnost, etalon

## **SUMMARY**

This paper describes and attempts to standardize the procedure for calibrating relative humidity meters. The thermodynamic bases of ideal gas, real gas, and humid air are explained. The principle of operation and the method of using a moisture generator and standards are presented. Calibration methods are described, how to reduce uncertainties and how to properly handle the measuring device and protect it from damage. It states what should be contained and what the calibration certificate should look like and how to calculate the measurement uncertainties. At the end of the paper, the procedure of calibration of one device that is used in industry is described, on the example of which the application of theoretically processed bases from the first half of the paper was shown.

Key words: humidity measurement, humid air, calibration, measurement uncertainty, standard

## **1. UVOD**

Tema završnog rada je postaviti minimalne zahtjeve za etalone relativne vlažnosti, opremu za umjeravanje, postupak umjeravanja i procjenu mjerne nesigurnosti kod umjeravanja mjerila relativne vlažnosti. Primjenjiva je na uređaje za umjeravanje s izravnim mjerenjima relativne vlažnosti koji rade pomoću otporničkih, kapacitivnih, otporničko-elektrolitskih te mehaničkih senzora. U ovom radu, termin vlažnost plina odnosi se na plinske medije koji se sastoje od (nosivog) plina (suhi zrak ili čisti vodik) i u njemu otopljene vodene pare. Upute će najčešće vrijediti i za druge nosive plinove, ali u tim situacijama upute treba uzeti s dozom opreza.

Ako se uz mjerenje relativne vlažnosti želi obaviti i mjerenje temperature (ili je mjerenje temperature ključno za posredno izračunavanje relativne vlažnosti) potrebno se pozvati na ostale, već utemeljene standarde kao što je njemački DKD-R 5-1 ili DKD-R 5-3.

## 2. TERMODINAMIČKE OSNOVE RELATIVNE VLAŽNOSTI

### 2.1. Jednofazni i višefazni sustavi

Čisti plin je sustav koji sadrži isključivo jednofazno jednokomponentni plin (npr. čisti dušik u plinovitom stanju). Kad se sustav sastoji od mješavine supstanci od kojih su obje u plinovitom stanju takav sustav nazivamo plinska smjesa (npr. vlažni zrak). Nadalje, sustav se može sastojati od više faza, takve sustave nazivamo višefaznim sustavima. Iako su višefazni sustavi najčešće sastoje od različitih agregatnih stanja (npr. zasićeni vlažni zrak iznad vodene površine), sustav se ne mora nužno sastojati od više agregatnih stanja ako se nalazi u području netopivosti (npr. ulje u vodi). Takvi sustavi se neće obrađivati u ovom radu [1], [2].

### 2.2. Vlažnost zraka (plina)

Vlažnost zraka, laički objašnjeno, je količina vodene pare u vlažnom zraku. Može se iskazati raznim varijablama kao što su maseni udjeli svedeni na masu smjese ili suhog zraka:  $\zeta$  ili  $x$ , količinski udio  $n$  ili relativna vlažnost  $h$ . Kada se govori vlažnosti plina, misli se na vodenu paru u nosivom plinu koji nije suhi zrak (npr. vodik) [1], [2].

### 2.3. Idealni plin

Idealni plin je teorijski termodinamički pojam koji omogućuje lakšu teorijsku generalizaciju. Idealni plin također može biti jednokomponentni i višekomponentni, ako je višekomponentni svaka se komponenta također ponaša kao idealni plin. Idealna plin je koristan pojam jer prati dugo korištene termodinamičke zakone i koncepte kao što su: molekularna teorija plinova, jednadžba stanja idealnog plina, unutarnja energija idealnog plina, Daltonov zakon itd. Većina plinova se, pri normalnom tlaku i temperaturi, ponašaju kao idealni plin unutar razumnih odstupanja [1], [2].

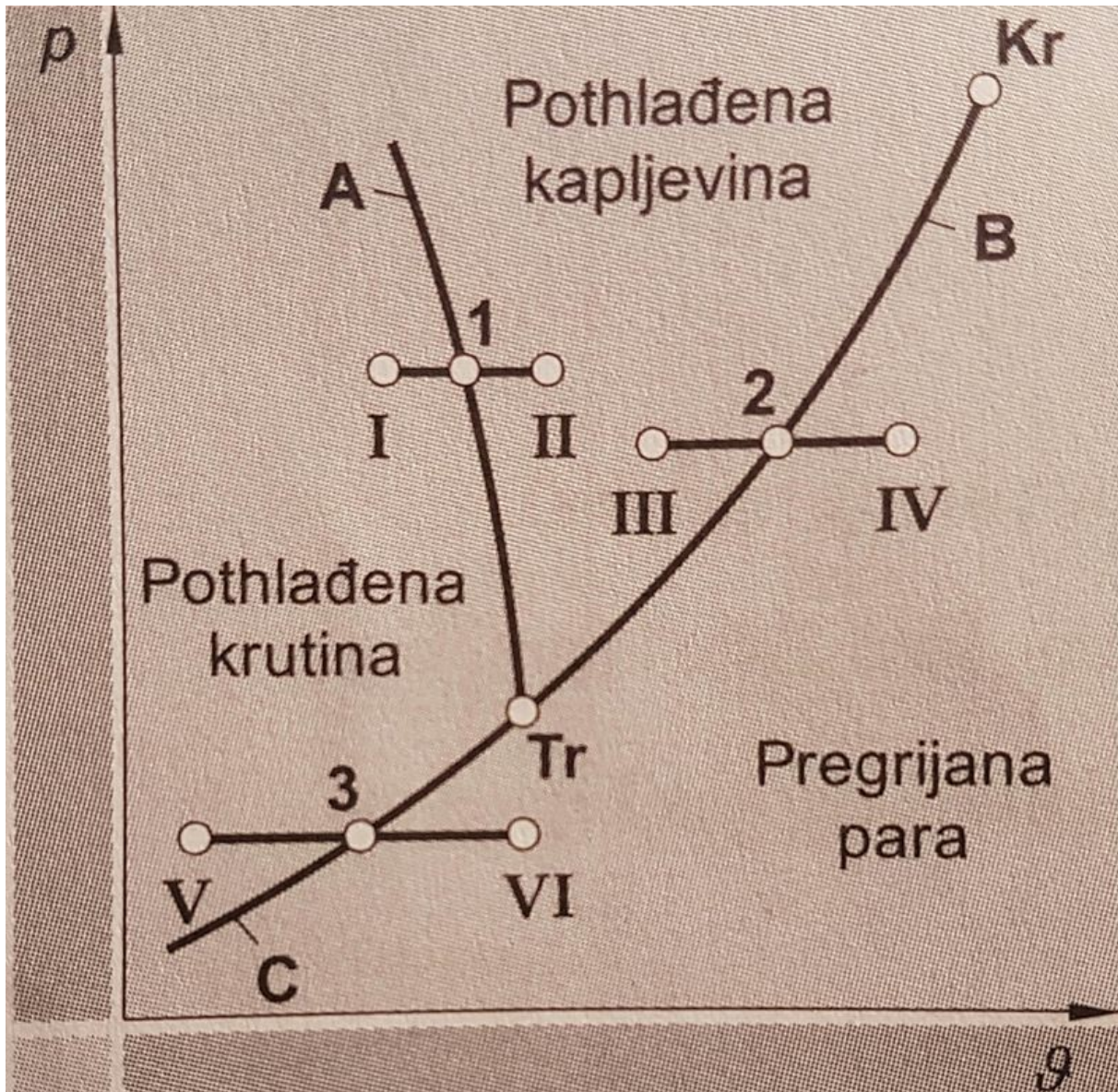
### 2.4. Tlak vodene pare

Tlak vodene pare je onaj tlak kojim vodena para u plinskoj mješavini doprinosi ukupnom tlaku. Intuitivnije pojašnjeno, kad bi se uklonile sva čestice vodene pare iz plina, ukupni tlak plina (za isti tlak i temperaturu) smanjio bi se za tlak vodene pare [1], [2].

### 2.5. Tlak zasićenja čiste tvari

Tlak zasićenja jednokomponentne tvari predstavlja tlak koji se postiže u zatvorenom sustavu za zadanu temperaturu pri toplinskoj i mehaničkoj ravnoteži parne i kapljevite ili parne i krute faze. U stručnoj literaturi se označava  $e_w$  (tlak zasićenja iznad kapljevite faze) ili  $e_i$  (tlak

zasićenja iznad krute faze) [1]. U tom slučaju tlak zasićenja jednak je tlaku parovite faze i ovisan je samo o temperaturi zasićenja. Funkcijska ovisnost temperature zasićenja o tlaku zasićenja naziva se linija napetosti. Pri temperaturama nižim od  $0.01\text{ °C}$  (temperatura trojne točke vode) obje situacije su moguće: tlak zasićenja iznad vode i iznad leda. Za istu temperaturu, tlak zasićenja iznad vode biti će veći od onog iznad leda [2].



Slika 1. Kvalitativni  $p$ - $g$  dijagram za vodu [2]

## 2.6. Realni plin

Zbog različitih međumolekularnih interakcija, oblika i nezanemarive veličine molekula te ostalih uvjeta realni plinovi odstupaju od zakona idealnog plina. Da bi predstavili devijacije od ponašanja idealnog plina autor [1] uvodi notaciju u kojoj se veličine u realnim plinovima i



plinskim smjesama označavaju apostrofom npr.  $p$  je tlak idealnog plina, a  $p'$  je tlak realnog plina.

## 2.7. Parcijalni tlak vodene pare

Parcijalni tlak vodene pare je parcijalni tlak vode u parnoj fazi u realnom plinu ili mješavini plinova. Kod idealnih plinova parcijalni tlak svakog sudionika proporcionalna je njegovom količinskom udjelu, a zbroj parcijalnih tlakova svih sudionika jednak je ukupnom tlaku. [1][2]

## 2.8. Tlak zasićenja u mješavini plinova

Zbog molekularnog međudjelovanja individualnih komponenti u mješavini realnih plinova (npr. vlažni zrak), postoji razlika u ponašanju pojedine komponente u odnosu na ponašanje jednokomponentnog plina (npr. vodene pare). Ove razlike uzimaju se u obzir uvođenjem takozvanog faktora poboljšanja  $f$ . Faktor poboljšanja izračunava se iz temperature  $t$ , tlaka  $p$  i tlaka zasićenja čistog plina  $e_w$  ili  $e_i$ . Tako je tlak zasićenja vodene pare u vlažnom zraku iznad tekuće vode ili leda iskazan sljedećim jednadžbama: [1]

$$e_w'(p, t) = e_w(t) \times f(p, t) \quad (1)$$

$$e_i'(p, t) = e_i(t) \times f(p, t) \quad (2)$$

## 2.9. Temperatura točke ledišta i temperatura točke rosišta

Izobarno hlađenje vlažnog zraka pri temperaturi točke rosišta,  $t_d$ , rezultira kondenzacijom vlage u obliku kapljica, dok izobarno hlađenje pri temperaturi točke smrzavanja,  $t_f$ , rezultira sublimacijom vlage u obliku ledenih iglica. Pritom je parcijalni tlak vodene pare jednak tlaku zasićenja. Uz pomoć sljedećih jednadžbi parcijalni tlak vodene pare može biti izračunat iz temperature točke smrzavanja ili rosišta i faktora poboljšanja  $f$ . [1]

## 2.10. Relativna vlažnost

Relativna vlažnost ( $U_w$ ) je omjer vrijednosti parcijalnog tlaka vodene pare u zraku ( $e'$ ) i tlaka zasićenja ( $e_w'$ ) pri istoj temperaturi. Često se izražava u postocima.

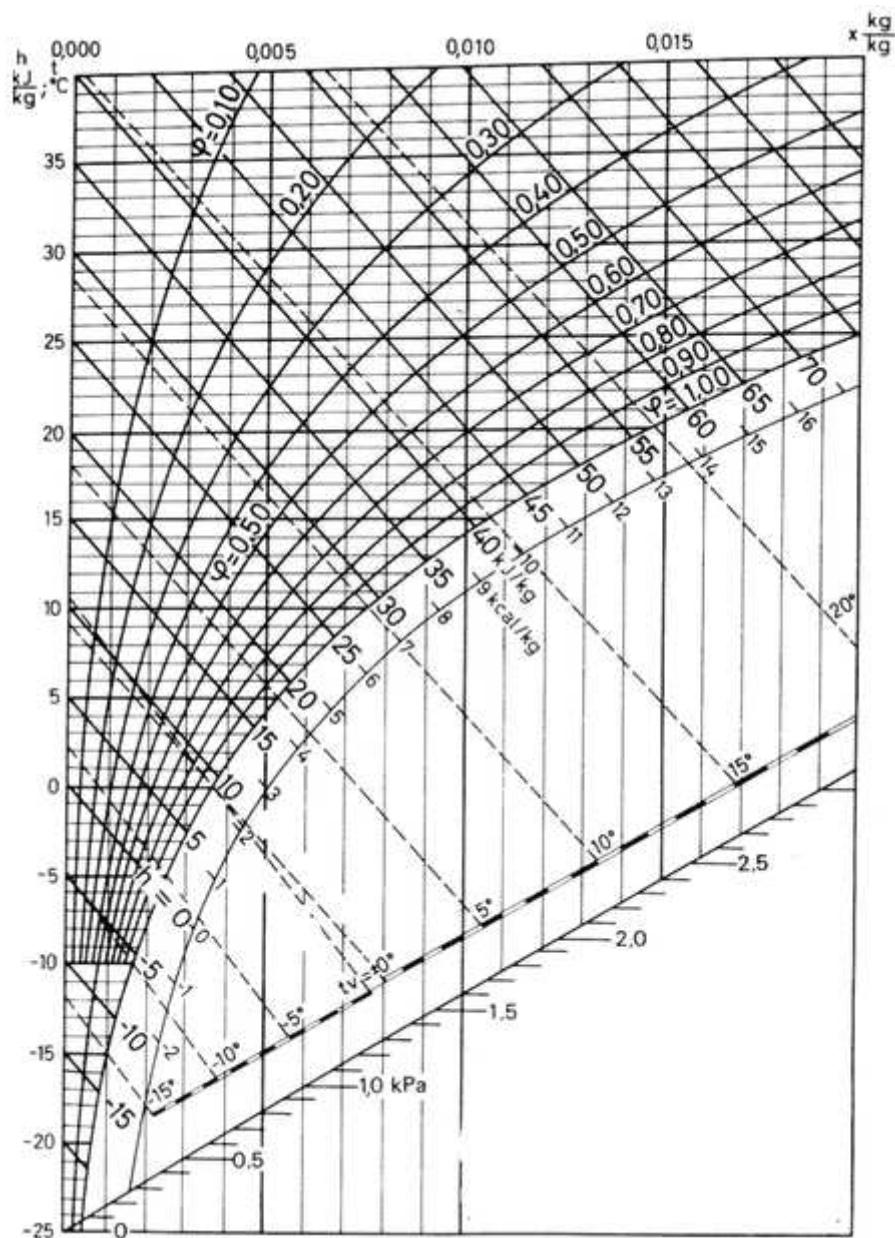
Pri temperaturama većim od  $0^\circ\text{C}$  označava se s:

$$h_w = \frac{e'}{e_w'(p, t)} \quad (3)$$

a pri temperaturama manjim od 0°C označava se s:

$$h_i = \frac{e'}{e_i(p, t)} \quad (4)$$

(Prema svjetskoj meteorološkoj organizaciji WMO relativna vlažnost s u oba slučaja označava s  $U_w$ .) [1]



Slika 2. Mollierov dijagram

Ako tlak zasićenja nadiđe tlak plina (npr. pri 101325 Pa i 99.974°C) relativna vlažnost od 100% ne može se više postići. U tom slučaju relativna vlažnost se iskazuje kao omjer parcijalnog tlaka vodene pare i najmanjeg tlaka (a većeg od tlaka zraka) pri kojem bi zasićenje bilo moguće. U slučaju zasićenja, vlažni zrak sastoji se samo od vodene pare (čista tvar) pa korekcija nije potrebna. Tlak zasićenja čiste pare postaje referentna veličina za određivanje vlažnosti i iskazuje se sljedećom jednadžbom:

$$h_{w,hyp} = \frac{e'}{e_w'(t)} \quad (5)$$

Zbog ovisnosti relativne vlažnosti o temperaturi plina, temperatura i njen utjecaj mora se uzeti u obzir pri umjeravanju i u proračunu mjerne nesigurnosti.

Ako se relativna vlažnost mjeri neizravno, kao u slučaju kapacitivnog osjetnika, već određena korištenjem prethodnih jednadžbi mjeritelj mora imati na umu da se parcijalni tlak vodene pare ne može računati izravno. Ipak, može se računati neizravno temperaturom rošenja, pritom se koriste sljedeće jednadžbe:

$$e' = e_w'(p_M, t_d) = e_w(t_d) \times f(p_M, t_d) \quad (6)$$

$$e' = e_i'(p_M, t_f) = e_w(t_f) \times f(p_M, t_f) \quad (7)$$

Tlak zasićenja vodene pare jednak je tlaku vodene pare pri temperaturi rosišta ili temperaturi ledišta (desublimacije). [1]

### 3. ETALONI

Svi etaloni moraju biti, izravno ili neizravno, povezani s nacionalnim standardima. Umjeravanje se obavlja tako da se izravno uspoređuju izmjerene vrijednosti s izmjerenim ili nametnutim vrijednostima. Najmanje mjerne nesigurnosti postižu se takozvanim primarnim metodama. Izvedene su dvotlačnim, dvotemperaturnim ili dvotlačno/dvotemperaturnim generatorima vlage. Takvi generatori stvaraju stabilni protok vlažnog zraka poznate vlažnosti koji je povezan s mjerenjima temperature i tlaka. Mjerenja temperature i tlaka znatno su jednostavnija, pa se mogu obaviti znatno manjim nesigurnostima. Higrometri točke rosišta i psihrometri koriste se kao dugoročna i precizna mjerila relativne vlažnosti. Principi rada mjerila temperature i tlaka zraka, iako nužni za mjerenje relativne vlažnosti, u ovom radu neće se obrađivati. Kapacitivni i otpornički higrometri koriste se za izravna mjerenja, dugoročno su manje pouzdani od navedenih te zahtijevaju međutestove i češća umjeravanja. Svi utjecajni faktori moraju biti zabilježeni zbog pozivanja na postojeće etalone. Pri mjerenju temperature (npr. temperature zraka ili temperature rosišta) svi međusobno neovisni utjecajni faktori moraju zasebno biti uračunati u proračun mjerne nesigurnosti (npr. toplinski ponor termopara, zračenje, itd.) Ako se relativna vlažnost ne mjeri izravno nego se izračunava posredno korištenjem drugih izmjerenih vrijednosti, kao što je slučaj kod generatora vlage, u proračun mjerne nesigurnosti moraju se uzeti nesigurnosti mjerenja izmjerenih veličina kao i nesigurnosti korištenih jednadžbi. Kako je relativna vlažnost ovisna o temperaturi kao i o apsolutnoj vlažnosti, nesigurnost temperature zraka mora se uzeti u obzir pri proračunu nesigurnosti neizravno (jednadžbama) dobivenih rezultata [1]. Možda je potrebno napomenuti da sa svim instrumentima treba postupati kako uputstva mjernih organizacija nalažu; detaljnije o tome u nastavku rada.

#### 3.1. Dvotlačno/dvotemperaturni generatori vlage

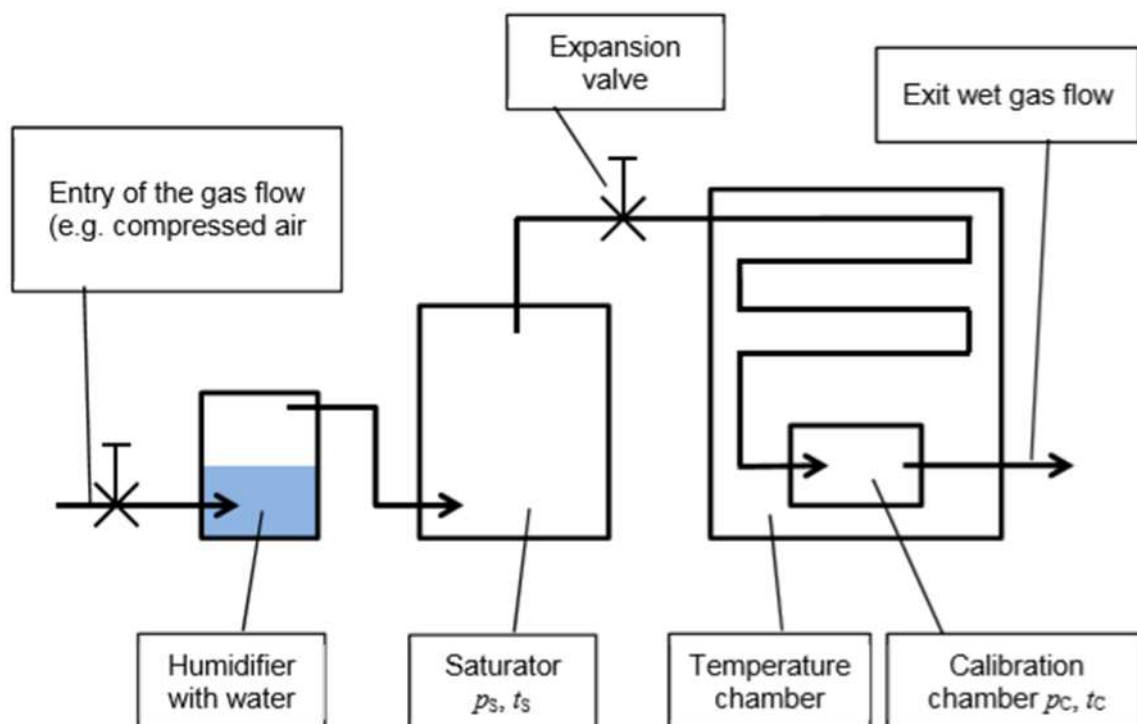
Proces počinje pripremom vlažnog zraka nepoznate vlažnosti i oslobođenog nečistoća. Dvotlačno/dvotemperaturni generator vlage bit će objašnjen na primjeru ovlaživanja stlačenog filtriranog vlažnog zraka: Nezasićeni zrak u pretlaku, nepoznate relativne vlažnosti prolazi preko zagrijane vodene površine u ovlaživaču. Zrak napušta ovlaživač umalo dosegnuvši stanje zasićenja pa ulazi u kondenzator. Kondenzator je posebno konstruirani metalni blok s velikom unutarnjom površinom čija se temperatura održava unutar zadanih vrijednosti. Ta temperatura niža je od temperature zraka pri izlazu iz ovlaživača pa zrak postaje prezasićen. Višak vlage se pri hlađenju odvaja, a iz kondenzatora izlazi zasićeni zrak poznatog tlaka  $p_s$  i temperature  $t_s$ .

Parcijalni tlak čiste vodene pare  $e_w(t_s)$  poznat je iz linije zasićenja (linija zasićenja naziv je funkcijske ovisnosti tlaka čiste vodene pare o temperaturi, često se koriste iskustvene funkcije kao što je Sonntagova formula, koja također unosi poznatu nesigurnost). Parcijalni tlak vodene pare u vlažnom zraku dobiva se množenjem te vrijednost s faktorom uvećanja  $f_w(p_s, t_s)$  (opet, faktor uvećanja može se iskazati iskustvenom formulom kao što je Bögelova formula). Nadalje, vlažni zrak sada ekspanzira na ekspanzijskom ventilu i ulazi u kalibracijsku komoru pod tlakom  $p_c$ . Zbog očuvanja količina (nema kemijskih reakcija), apsolutna vlažnost ostaje ista kao na izlazu iz kondenzatora. Promjenom temperature kondenzatora i tlaka kondenzatora može se postići širok raspon relativne vlažnosti.

Analogno pripremi vlažnog zraka iznad vode, priprema se vlažni zrak iznad leda; razlika je u tome što kondenzirani zrak prolazi iznad posebnog ovlaživača s ledenim blokom. Zrak izlazi iz ovlaživača zasićen. Kao i u slučaju ovlaživanja zraka iznad vodene površine, parcijalni tlak vodene pare pri izlasku iz ovlaživača računa se s vrijednostima parcijalnog tlaka po liniji napetosti  $e_i(t_s)$  i pripadajućim faktorom uvećanja  $f_i(p_s, t_s)$ .

Kako bi prikazali relativnu vlažnost, uređaj koji se umjerava postavlja se u komoru za kalibriranje koja se postavlja u komoru stabilne temperature. Vlažni zrak prolazi kroz temperaturnu komoru posebnim cjevovodom kako bi se tok zraka zadržao na željenoj temperaturi  $t_c$  prije ulaska u komoru za kalibriranje [1], [3]. Relativna vlažnost se izračuna prema formuli:

$$h_{i,w} = \frac{e_{i,w}(t_s) \times f_{i,w}(p_s, t_s)}{e_{i,w}(t_c) \times f_{i,w}(p_c, t_c)} \times \frac{p_c}{p_s} \quad (8)$$

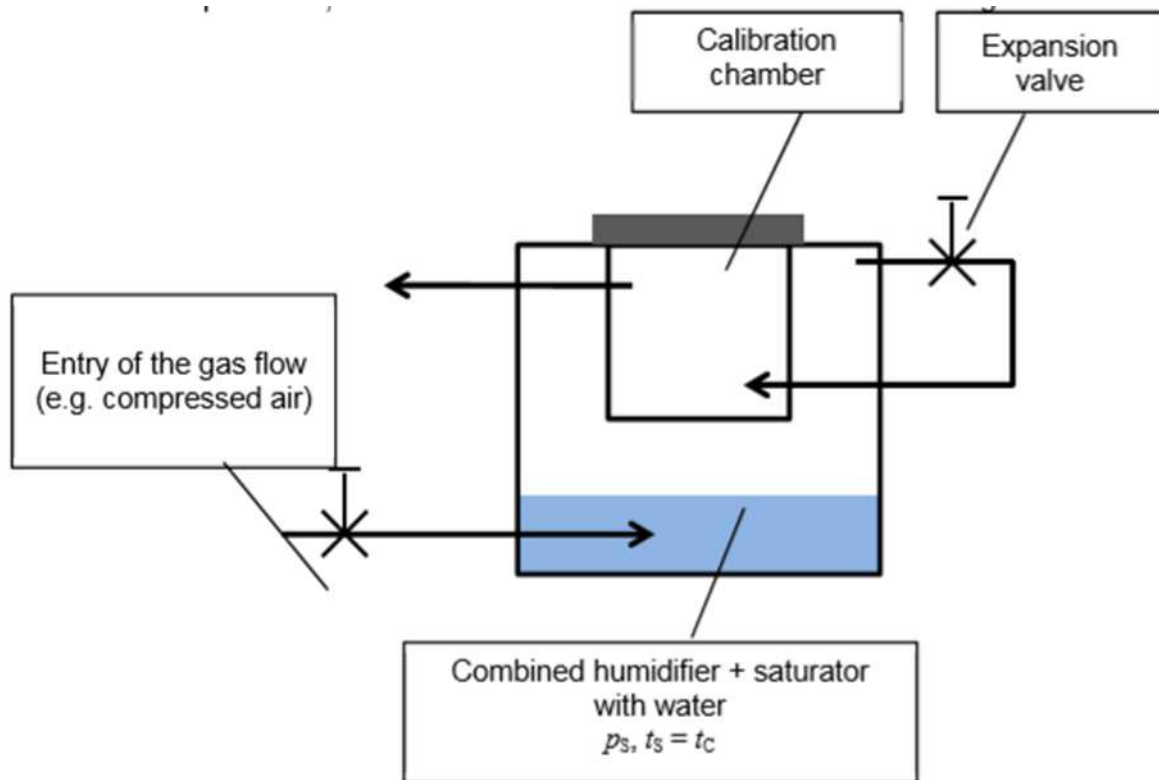


Slika 3. Shema dvotlačno/dvotemperaturnog generatora vlage

### 3.2. Dvotlačni generator vlage

Dvotlačni generator vlage je pojednostavljena verzija dvotlačno/dvotemperaturnog generatora. Temperatura zasićivača i komore za kalibriranje zbog konstrukcije su jednake. Zbog toga, tlakovi linije napetosti zasićivača i komore su jednaki (ovisni samo o temperaturi) te se relativna vlažnost izračunava iz omjera tlaka komore za kalibriranje i tlaka zasićivača, uzimajući u obzir odgovarajuće faktore uvećanja.

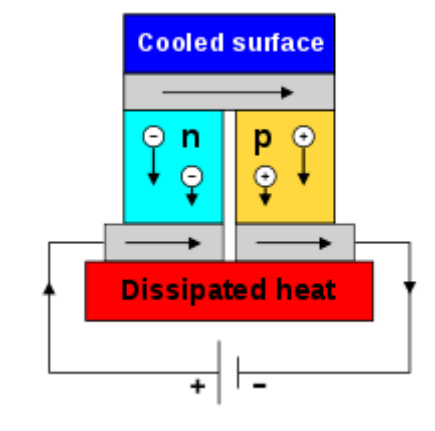
$$h_{i,w} = \frac{f_{i,w}(p_s, t_s)}{f_{i,w}(p_c, t_c)} \times \frac{p_c}{p_s} \quad (9)$$



Slika 4. Shema dvotlačnog generatora vlage

### 3.3. Higrometar točke rosišta

Zrcalna površina hladi se (metodom Peltierovog efekta) dok teže hlapivi fluid ne kondenzira. Kondenzacija (ili desublimacija) se može opažati vizualno, npr. fotoelektričnim diodama. Kad se zrcalo orosi, senzor zaustavlja hlađenje. Tako se površinska temperatura zrcala održava na temperaturi rosišta za određeni sastav mješovitog plina. Ta temperatura mjeri se osjetnikom ispod zrcala i označava temperaturu točke rošenja za određeni sastav.



Slika 5. Peltierov (termoelektrični) efekt

Kako bi se odredila relativna vlažnost potrebno je, uz temperaturu točke rošenja, mjeriti temperaturu i tlak plina. Nakon što se izmjere sve veličine, relativna vlažnost se izračunava jednadžbom parcijalnog tlaka pare uzimajući u obzir faktor uvećanja:

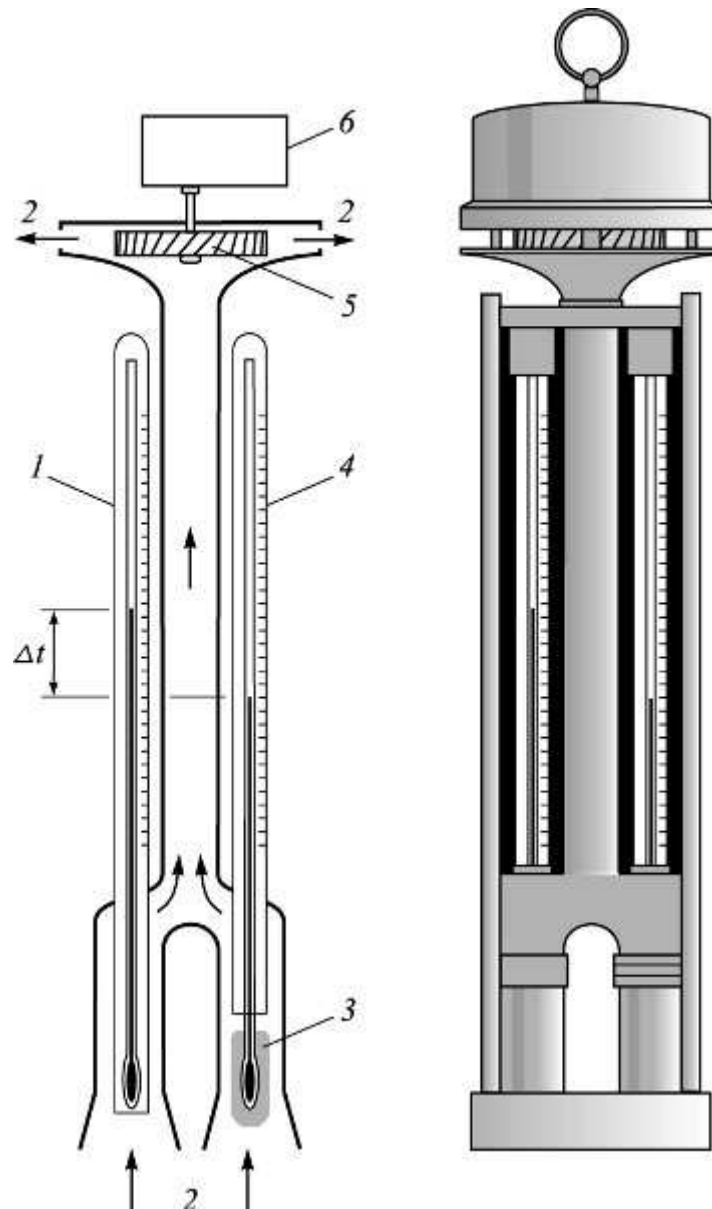
$$h_{i,w} = \frac{e(t_{d,f}) \times f_{i,w}(p, t_{d,f})}{e_{i,w}(t) \times f_{i,w}(p, t)} \quad (10)$$

### 3.4. Psihrometar

#### 3.4.1 Princip rada

Psihrometar se sastoji od 2 termometra, od kojih jedan (suhi) mjeri temperaturu zraka ( $t$ ), dok drugi (vlažni) je omotan vlažnom krpicom (najčešće pamuk natopljen destiliranom vodom). Što je zrak suši voda iz krpice će brže ishlapljivati, pritom mijenja agregatno stanje iz tekućeg u plinovito i za to joj je potrebna toplinska energija, tu energiju uzeti će iz krpice i glave vlažnog termometra. Očito je da će vlažni termometar mjeriti nižu temperaturu što je zrak suši, a pokazivat će istu temperaturu kao i suhu pri mjerenju zasićenog zraka. Unutar mjernog aparata ugrađen je ventilator s opružnim mehanizmom toplinski izoliran od uređaja. koji osigurava stalno strujanje zraka oko oba termometra. Srebrne kuglice oba termometra također su međusobno izolirane kako bi se izbjegao prijenos topline zračenjem između njih. Stanje zraka dobije odredi se iz Mollierovog dijagrama; točka stanja zraka sjecište je pravaca izoterme suhog termometra s izotermom magle vlažnog termometra [2].





**Slika 6. Shema psihrometra**

- 1- Suhi termometar, mjeri temperaturu zraka
  - 2- Struja zraka kojom se mjeri vlažnost
  - 3- Vlažna krpica
  - 4- Vlažni termometar – mjeri temperaturu ohlađene vlažne krpice
  - 5- Ventilator
  - 6- Motor ventilatora, izoliran da bi toplina stroja minimalno utjecala na rezultat mjerenja
- $\Delta t$ - psihometrijska temperaturna razlika

### 3.4.2. Uvjeti i umjeravanje

Precizna mjerenja zahtijevaju određene preduvjete: vlažni termometar mora stalno biti vlažan tj. mora postojati tekući granični sloj na rubu pamuka, voda ne smije sadržavati nečistoće i mora se osigurati stalan i stabilan protok zraka. Treba uzeti u obzir da će vlažnost zraka na izlazu iz psihometra biti veća od vlažnosti na ulazu.

Psihometri se mogu umjeriti na dva načina – prvi je da se odvojeno ispita preciznost oba termometra. Termometri se moraju umjeriti za cijelu deklariranu domenu relativne vlažnosti i temperature. To znači da će suhi termometar biti umjeren u deklariranoj domeni temperature, a vlažni će termometar biti umjeren od temperature vlažnog termometra za minimalnu temperaturu i minimalnu vlažnost do maksimalne deklarirane temperature. Osim umjeravanja termometara nužno je ispitati i ostale utjecajne faktore kao što su vlažnost krpice, brzina strujanja i utjecaj zračenja na temperaturu vlažnog termometra. Ova ispitivanja mogu se provesti uspoređujući rezultate mjerenja relativne vlažnosti.

Drugi način umjeravanja je uspoređivanje relativnih vlažnosti generatorom vlage. U tom slučaju umjeravanje se provodi za više različitih stanja zraka, ovisno o području primjene. Preporučuje se da se uređaj ispita na minimalno 3 različite relativne vlažnosti za minimalnu, srednju i maksimalnu temperaturu. Ako se koristi kao etalon, umjeravanje će vrijediti 24 mjeseca. Osim toga, nužno je uvesti niz međutestova koji će provjeriti ispravnost mjernog uređaja (npr. ispitivanje termometara na točki ledišta vode) [1], [2].

### 3.5. Senzori relativne vlažnosti

Senzori vlage pripadaju skupini mjernih uređaja koji mjere relativnu vlažnost izravno. Koriste se Kapacitivni polimerni senzori ili otporničko-elektrolitski senzori. Senzorski signal se elektronički obrađuje i daje podatke o relativnoj vlažnosti. Ostali senzorski mjerni uređaji, kao što su kruti otpornički senzori, ne preporučuju se kao standardi.

Pri korištenju senzora kao etalona minimalno dva se moraju koristiti, pritom se preporučuje raznovrsnost uređaja. Razlika rezultata uzeti će se u obzir pri proračunu mjerne nesigurnosti. Senzori moraju biti umjereni za cijelo područje primjene. Razlike između umjerenih točaka ne bi smjele prelaziti 20% relativne vlažnosti (i trebale bi biti manje što je manja mjerna nesigurnost). Senzori koji se koriste kao standardi trebali bi se umjeravati barem jednom svakih 12 mjeseci. Više mjera potrebno je poduzimati kako bi se spriječile veće pogreške, potrebno je spriječiti onečišćavanje senzora štetnim tvarima ili plinovima. Mjere uključuju:

- Čistoću uređaja
- Detaljnu provjeru svih dijelova na zagađenje
- Korištenje primjerenih sredstava za čišćenje u laboratoriju
- Pospremanje senzora na prikladna mjesta
- Ako je nužno, privremeno ukloniti etalon iz prostora laboratorija tijekom renoviranja ili uređivanja dijela prostora.

Osim svega navedenog, nužno je provesti međutestiranja. Ako se ne provode, u proračunu nesigurnosti mora se uzeti u obzir pravokutna raspodjela od minimalno 2%. Međutestiranja trebala bi se provoditi minimalno jednom mjesečno. Prikladni načini međutestiranja jesu:

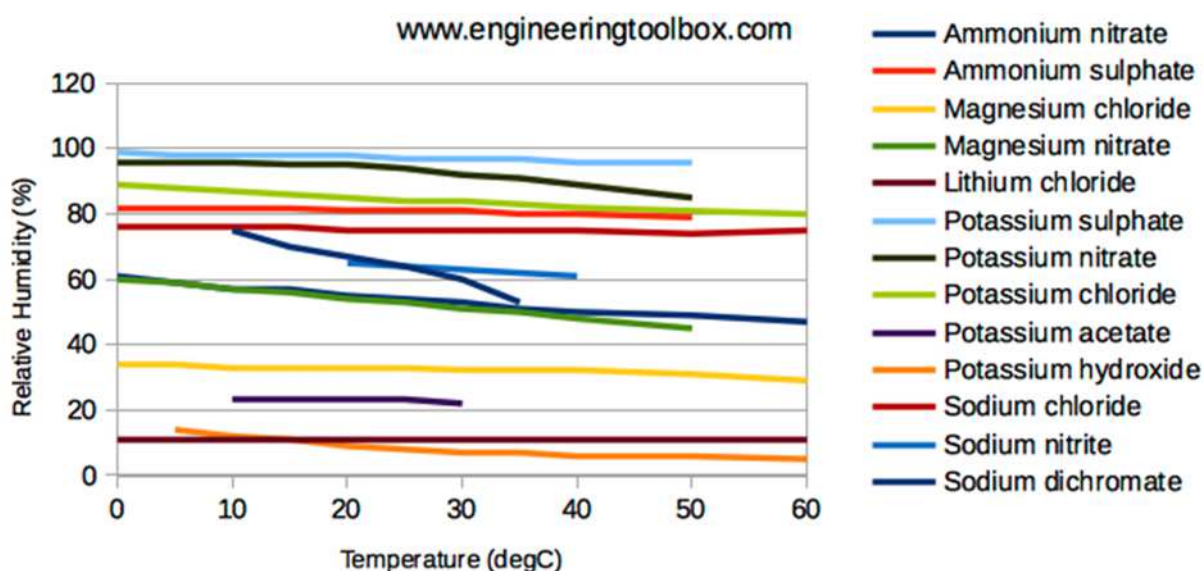
- Testiranje korištenjem točnije reference
- Testiranje nezasićenim otopinama soli
- Usporedbom sa senzorom koji se ne koristi za umjeravanje

Međutestiranja je potrebno dokumentirati i rezultati moraju biti uzeti u obzir pri proračunu mjerne nesigurnosti. Ako se razlike u mjerenjima pokažu prevelike potrebno je poduzeti adekvatne mjere.

### **3.6. Otopine soli**

Autor [1] ne preporučuje korištenje otopina soli kao zadovoljavajuću metodu umjeravanja mjerila, ali, kako je već spomenuto, mogu se koristiti za međutestiranja.

Različiti kemijski sastavi soli zasite se na različitim klimatskim uvjetima, tj. određeni kemijski sastav se zasiti na određenoj vrijednosti relativne vlažnosti ovisno o temperaturi. Primjer ovisnosti vlažnosti zasićenja o kemijskom sastavu i temperaturi prikazan je u sljedećem dijagramu:



**Slika 7. Dijagram zasićenja soli u ovisnosti o temperaturi smjese**

Korištenje soli je jeftin i učinkovit način generiranja stanja zraka i obavljanja umjeravanja ili međutestiranja mjerila vlažnosti na terenu. Rok trajanja soli ovisi o vrsti, ali najčešće je 2 do 3 godine ako se skladišti na suhom i hladnom mjestu bez izravnog sunčevog zračenja. Ovisno o veličini spremnika vrijeme stabilizacije može biti između 6 i 20 sati [5].

## 4. METODE UMJERAVANJA

Umjeravani uređaj postaviti će se unutar uređaja za umjeravanje sukladno izvedbi umjeravanog uređaja ili prema zahtjevima klijenta (npr. hoće li uređaj biti cijeli postavljen u klima komoru ili samo vanjski senzor). Ako u dilemi, potrebno se obratiti klijentu. Dubina instalacije, koja uključuje sve dijelove umjeravanog uređaja koji su izloženi temperaturi umjeravanja, mora biti pravilno dokumentirana u certifikatu umjeravanja.

Pri umjeravanju relativne vlažnosti mora se osigurati stabilnost varijabli tijekom vremena. Pri podešavanju željenih termodinamičkih stanja potrebno je osigurati da etalon i umjeravani uređaj nisu izloženi kondenzaciji, tj. temperatura mora uvijek biti viša od temperature točke rosišta za određenu vlažnost. Opasnost od kondenzacije javlja se pri otvaranju uređaja za umjeravanje i vađenju senzora iz istog. Ako tad postoji opasnost od kondenzacije, prije otvaranja uređaja ili vađenja senzora potrebno je podesiti klimatske uvjete kako bi se kondenzacija izbjegla. Ako je nužno, isti postupak potrebno je obaviti kako bi se spriječilo isušivanje senzora.

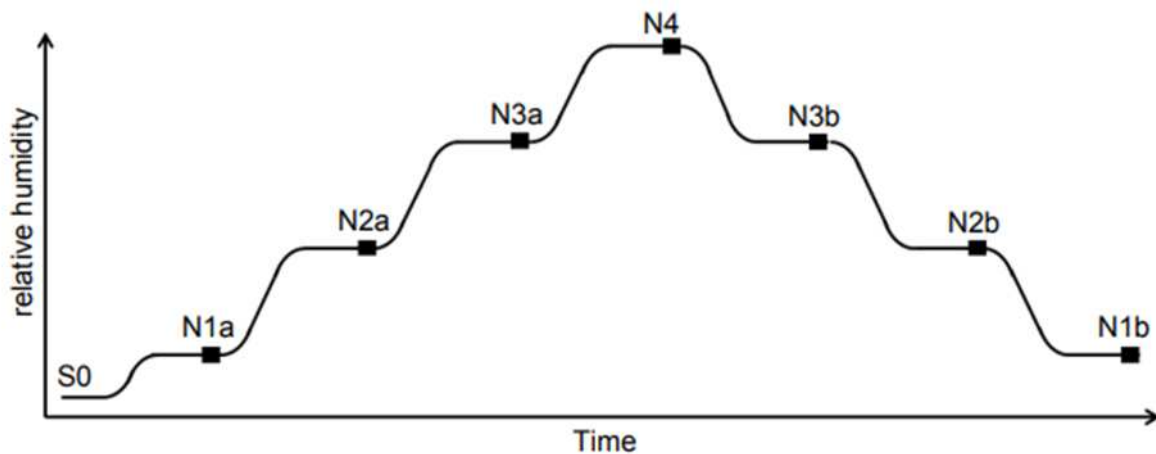
Umjeravane točke sastoje se od umjerenih vrijednosti relativne vlažnosti za jednu ili više temperatura. Za svaku temperaturu zraka preporučuje se provođenje umjeravanja za barem 3 točke relativne vlažnosti. Umjeravane točke moraju biti odabrane kako bi pokrili mjerno područje koje klijent zahtijeva. Preporučuje se da se umjeravanje provodi od najviše temperature prema najnižoj, također se preporučuje da se za svaku temperaturu obave umjeravanje svih točaka relativne vlažnosti prije nego se nastavi na umjeravanje pri sljedećoj temperaturi. Za umjeravanje pri visokim temperaturama ( $t \geq 40^\circ\text{C}$ ) preporučuje se umjeriti uređaj na okolišnoj temperaturi ( $t = 23 \pm 3^\circ\text{C}$ ) kako bi se dokumentirale moguće promjene na senzoru pri izlaganju visokim temperaturama [1].

## 5. SEKVENCE UMJERAVANJA PRI ODREĐENOJ TEMPERATURI

### 5.1. Sekvenca A1

Klimatska stanja različitih relativnih vlažnosti isprva se umjeravaju u uzlaznom nizu, zatim u silaznom, ne računajući vršnu vrijednost (N4). Ovakva metoda iznijeti će na vidjelo moguće histereze umjeravanog uređaja. Prva vrijednost (N1a) mora se postići iz stanja niže vlažnosti (S0), S0 mora biti barem 5% niže od N1a.

U certifikatu umjeravanja sve izmjerene vrijednosti moraju biti upisane pojedinačno. Mjerna nesigurnost izračunati će odvojeno i neće se uzeti u obzir nesigurnost zbog histereze. Osim toga, rezultati se mogu iskazati aritmetičkim uprosječivanjem gdje će se proračun nesigurnosti prikazati pravokutnom raspodjelom, te će se uzeti u obzir utjecaj histereze.

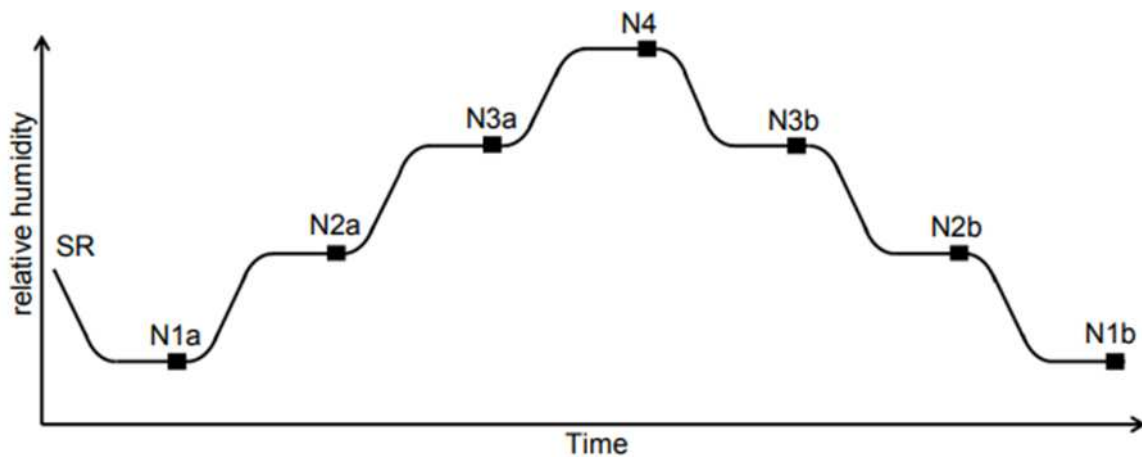


Slika 8. Dijagram promjene relativne vlažnosti umjeravanjem po sekvenci A1

### 5.2. Sekvenca A2

Primjenjujući ovu sekvencu, prvo se mjeri vlažnost uzlaznom putanjom, zatim silaznom uz uvjet da se do prve točke došlo iz pozicije više relativne vlažnosti. Kao u sekvenci A2 istraživati će se utjecaj histereze (točke N2a i N2b kao i točke N3a i N3b jednakih su vrijednosti, a postižu se iz različitih smjerova), a ponovljivost će se ispitivati mjerenjem točki N1a i N1b koje su se postigle iz isto smjera (iz viših relativnih vlažnosti). Točka N4 mjeri se jednom.

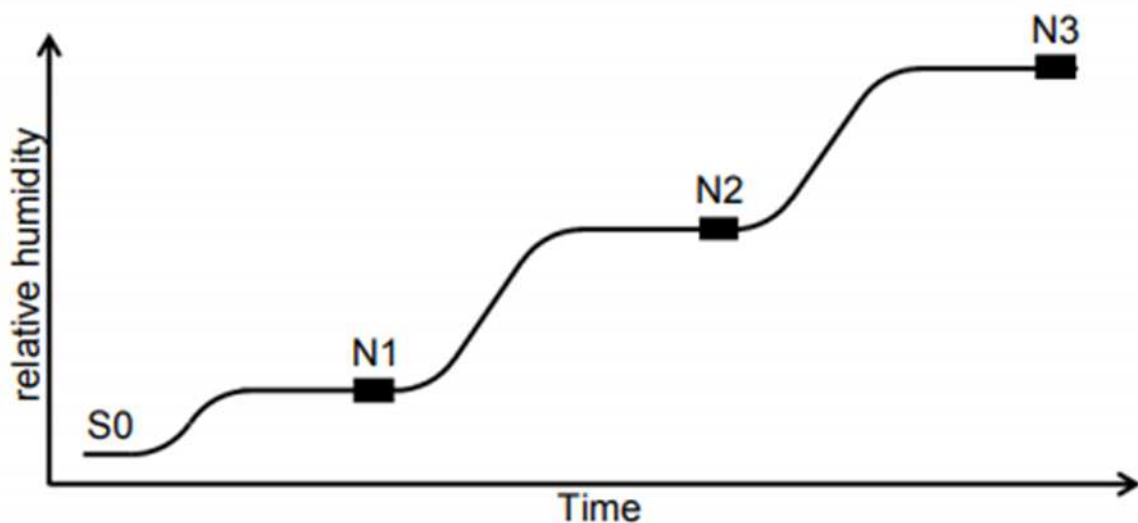
U certifikatu umjeravanja sve izmjerene vrijednosti moraju biti upisane pojedinačno. Mjerna nesigurnost izračunati će odvojeno i neće se uzeti u obzir nesigurnost zbog histereze ili ponovljivosti. S druge strane, rezultati se mogu iskazati uprosječenim vrijednostima (ne uključujući točku N4) gdje će se proračun nesigurnosti prikazati pravokutnom raspodjelom. U obzir će se uzeti utjecaj histereze i ponovljivosti.



Slika 9. Dijagram promjene relativne vlažnosti umjeravanjem po sekvenci A2

### 5.3. Sekvenca B1

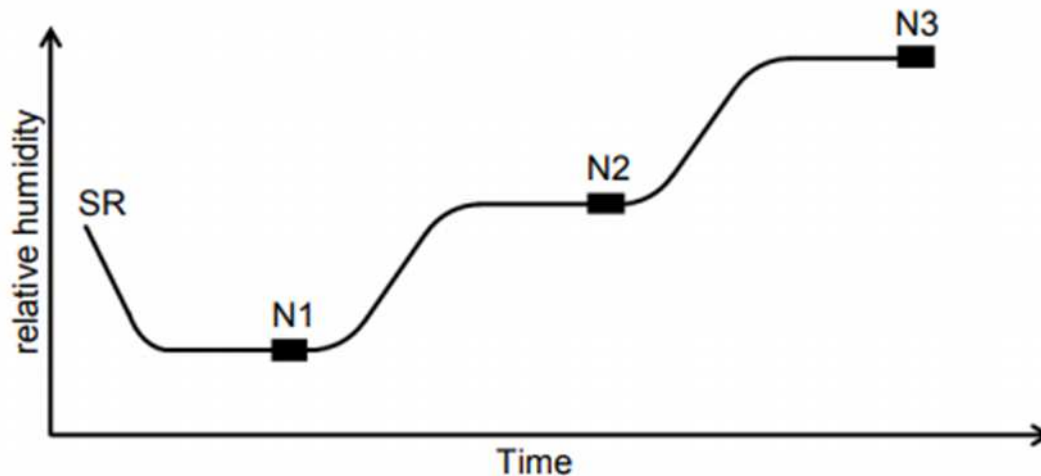
Točke relativne vlažnosti mjere se u uzlaznom redosljedju. Prvoj izmjerenoj točki (N1) pristupa se iz pozicije niže relativne vlažnosti (S0). S0 mora imati barem 5 %RV nižu relativnu vlažnost od N1. Ako potonji uvjet nije moguće ispuniti (točka N1 ima koordinatu  $h=0$  %RV ili je na donjoj granici relativne vlažnosti uređaja za umjeravanje) preporučuje se sekvenca B2. Nužno je osigurati dovoljno vrijeme stabilizacije varijabli. Utjecaji histereze i ponovljivosti ne ispituju se ovom metodom.



Slika 10. Dijagram promjene relativne vlažnosti umjeravanjem po sekvenci B1

#### 5.4. Sekvenca B2

Ovom metodom točke relativne vlažnosti mjere se uzlaznom putanjom uz uvjet da se prvoj točki pristupa se koordinate više relativne vlažnosti. Mogući utjecaj histereze ne ispituje se pri ovakvom načinu umjeravanja.

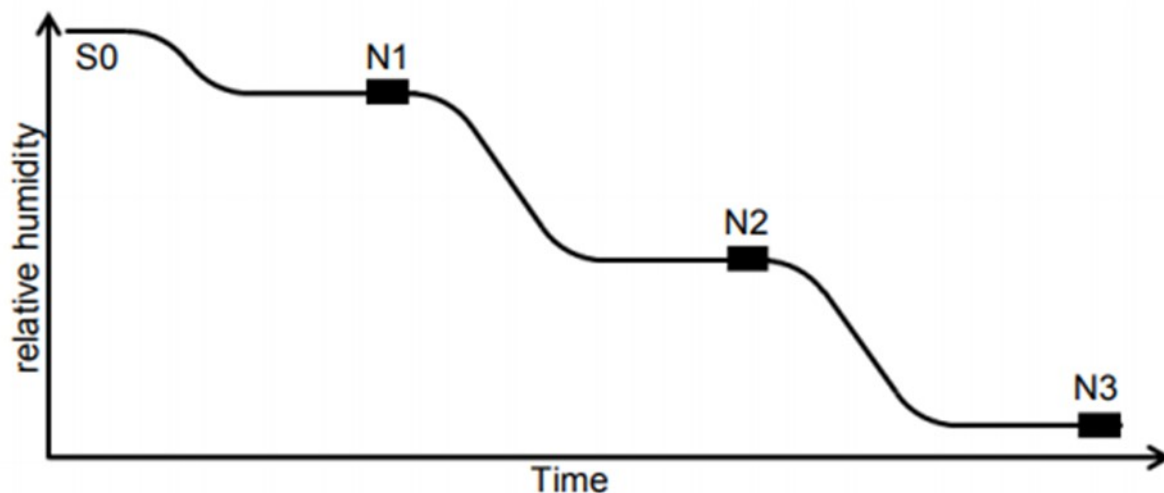


Slika 11. Dijagram promjene relativne vlažnosti umjeravanjem po sekvenci B2

#### 5.5. Sekvenca C1

Točke relativne vlažnosti mjere se u silaznom redosljedju. Prvoj izmjerenoj točki (N1) pristupa se iz pozicije niže relativne vlažnosti (S0). S0 mora imati barem 5 %RV višu relativnu vlažnost od N1. Ako potonji uvjet nije moguće ispuniti (točka N1 ima koordinatu  $h=100$  %RV ili je na gornjoj granici relativne vlažnosti uređaja za umjeravanje) preporučuje se sekvenca C2. Nužno je osigurati dovoljno vrijeme stabilizacije varijabli. Utjecaji histereze i ponovljivosti ne ispituju se ovom metodom.

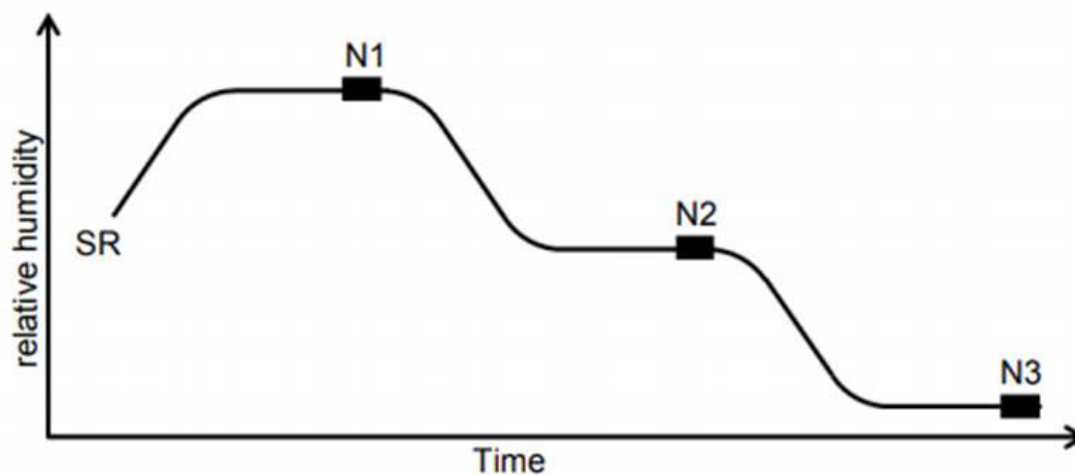




Slika 12. Dijagram promjene relativne vlažnosti umjeravanjem po sekvenci C1

### 5.6. Sekvenca C2

Ovom metodom točke relativne vlažnosti mjere se silaznom putanjom uz uvjet da se prvoj točki pristupa se koordinate više relativne vlažnosti. Mogući utjecaj histereze ne ispituje se pri ovakvom načinu umjeravanja.



Slika 13. Dijagram promjene relativne vlažnosti umjeravanjem po sekvenci C2

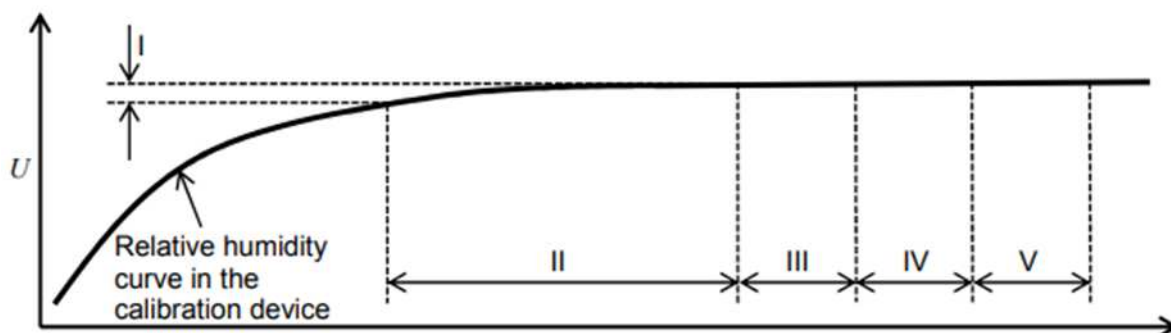
### 5.7. Sekvenca D

Nestandardizirana sekvenca koja se razvila u skladu sa zahtjevima korisnika. Procedura mora biti opisana u certifikatu umjeravanja.

## 6. VRIJEME URAVNOTEŽENJA

Potrebno vrijeme stabilizacije mjernih veličini mora biti ostvareno i dokumentirano. Vrijeme uravnoteženja je vrijeme potrebno da se mjerne veličine dovoljno približe željenim vrijednostima prije nego se te veličine počnu mjeriti. Procedura određivanja vremena uravnoteženja objašnjena je u nastavku teksta, ta procedura postavlja minimalne zahtjeve. Vrijeme uravnoteženja funkcija je raznih parametara među kojima su: stanje zraka, protok zraka kroz uređaj za umjeravanje, izvedbi istog, itd. Nerijetko je vrijeme stabilizacije duže od 3 sata.

Parametri se smatraju uravnoteženi ako mjerne veličine kroz 20 minuta ne odstupaju za više od 20 %RV od željene mjerne nesigurnosti (minimalno 10 mjerenja).



**Slika 14. Stabilizacija relativne vlažnosti**

- I) Kriterij da bi započelo vrijeme čekanja: odstupanje od željenih vrijednosti je manje od 2 %RV i 0.2 K
- II) Vrijeme čekanja, najmanje 30 min
- III) Zabilježavanje izmjerenih vrijednosti, najmanje 10 izmjera kroz minimalno 10 minuta
- IV) Vrijeme čekanja, najmanje 10 minuta
- V) Zabilježavanje izmjerenih vrijednosti, najmanje 10 izmjera kroz minimalno 10 minuta

Točka umjeravanja postavlja se na uređaju za umjeravanje. Prvo vrijeme čekanja počinje kad se stanje zraka dovoljno približi željenim vrijednostima, u ovom primjeru odstupanje je 2 %RV relativne vlažnosti i 0.2K od željene temperature. Nakon što isteče vrijeme čekanja (isječak II na dijagramu) počinje prvi niz mjerenja koji traje minimalno 10 minuta kroz koje će se izmjeriti 10 vrijednosti. Zatim će još jednom isteći vrijeme čekanja (isječak IV) nakon kojeg će se ponovno mjeriti po istoj proceduri kao u isječku II (minimalno 10 minuta te minimalno 10

izmjerenih vrijednosti). Ako je promjena u mjernoj devijaciji između isječaka III i V manja od 20 %RV željene mjerne nesigurnosti postignuta je željena stabilnost vrijednosti. Razlika u temperaturama između isječaka III i V također mora biti navedena.

Rezultat umjeravanja biti će vrijednosti koje su se izmjerile u vremenu V, a vrijeme stabilizacije zbroj je vremena II, III i IV. Ako uvjeti stabilizacije nisu postignuti nakon vremena V ponavlja se procedura s jednim vremenom čekanja i jednim vremenom mjerenja. Očito se i vrijeme stabilizacije prema tome produžilo. Sve navedene vremenske vrijednosti su minimalne zahtijevane, za točnija mjerenja preporučuje se da vremenski isječak IV traje 30 minuta [1].

## 7. CERTIFIKAT O UMJERAVANJU

Certifikat mora ispuniti zahtjeve normi koje se trenutno primjenjuju (DIN EN ISO/IEC 17025) kao i dodatne zahtjeve ovlaštene akreditacijske agencije ili lokalnih meteoroloških organizacija [1]. Osim toga, sljedeće stvari moraju biti naznačene:

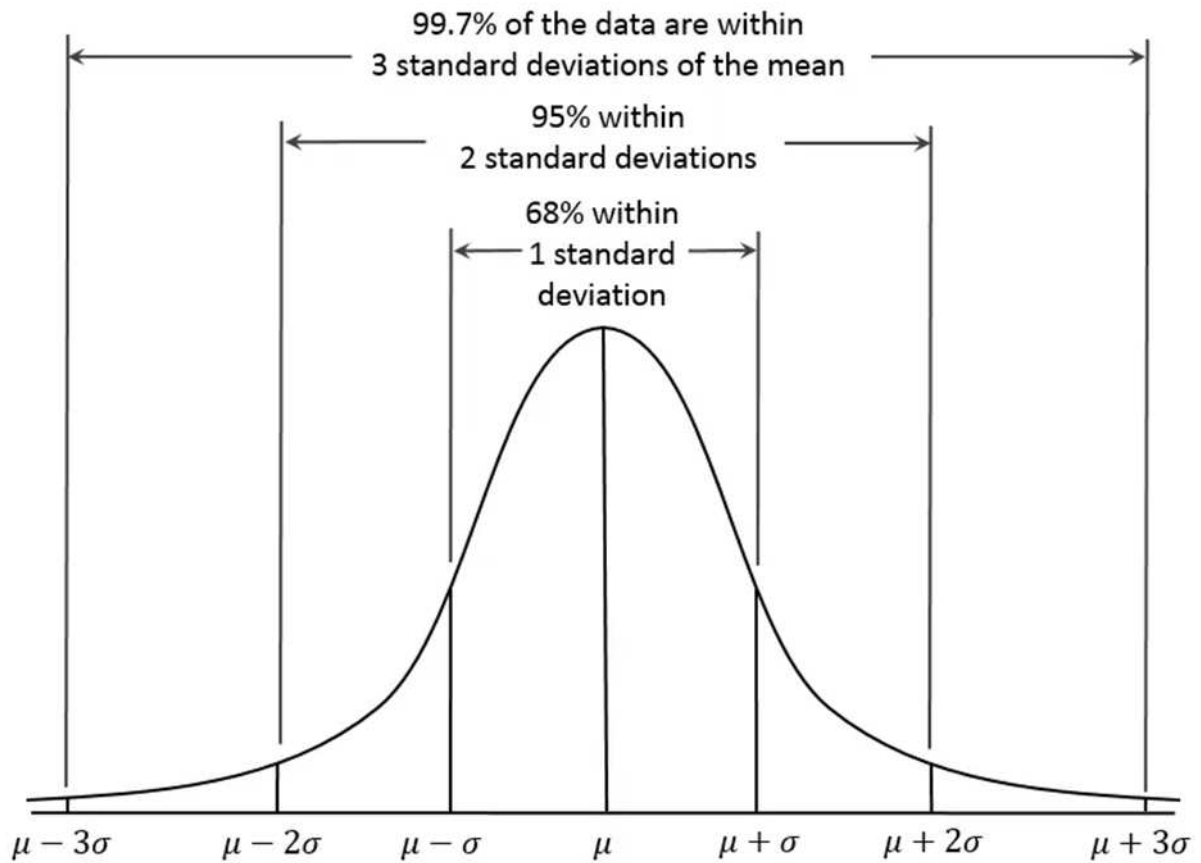
- Postupak pripreme, ako se razlikuje od već spomenute
- Metoda umjeravanja
- Sekvenca umjeravanja
- Redoslijed umjeravanja
- Dubina senzora
- Napomena treba li se uzeti u obzir histereza ili ponovljivost u proračunu nesigurnosti
- Temperatura okoliša
- Vlažnost okoliša (ako je relevantna)
- Rezultati umjeravanja s pripadajućim temperaturama

## 8. MJERNA NESIGURNOST I UTJECJNI FAKTORI

Mjerna nesigurnost kvantifikacija je statističkog rasipanja rezultata mjerenja. Sva mjerenja podložna su nesigurnosti i rezultat mjerenja potpun je samo kad se uz izmjeru izrazi nesigurnost. Mjerna nesigurnost varijabla je statističke prirode i izražava nesavršenost znanja varijable koja se pokušava izmjeriti. Klima komora u svom kontrolnom volumenu u određenom trenutku ima točan broj molekula zraka i točan broj molekula vode (napomena: ne uzimajući u obzir utjecaje relativizma i neodređenosti), dakle relativna vlažnost mogla bi se (savršeno) točno odrediti prebrojavanjem molekula, tim prebrojavanjem dobila bi se točna vrijednost relativne vlažnosti. Izmjerena vrijednost različita je od točne vrijednosti i ta razlika naziva se pogreška. Definiranjem mjerne nesigurnosti postavlja se interval unutar kojeg se pogreška nalazi ili, u slučaju pretpostavke statističke raspodjele, postavlja se interval unutar kojeg se pogreška nalazi s određenom vjerojatnosti [1], [4].

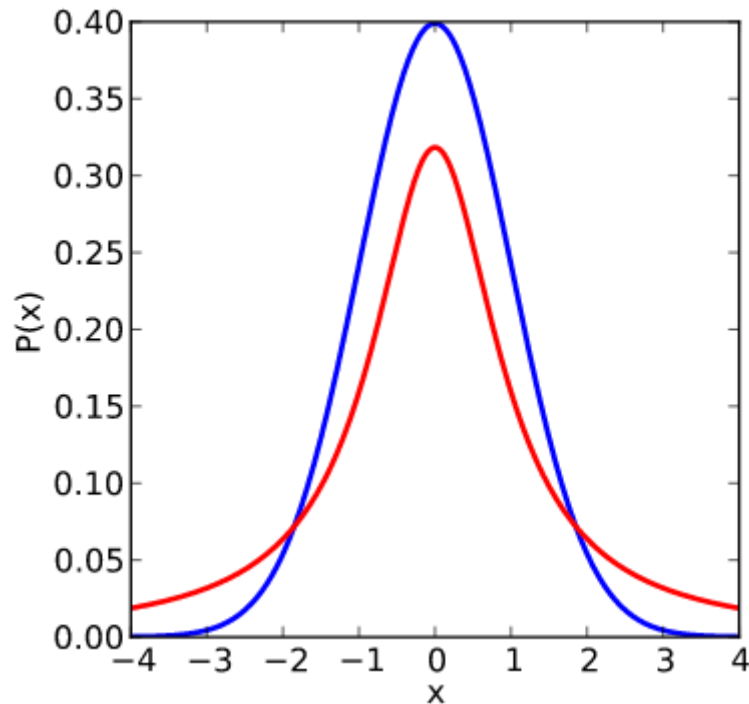
### 8.1. Normalna i Studentova raspodjela

Za statističku raspodjelu često se uzima normalna (Gaussova) raspodjela kojoj se za devijaciju uzima  $k=2$ . Pogreška će biti manja od  $2\sigma$  u 95.4% slučajeva kao što se vidi na sljedećoj slici.



**Slika 15. Normalna raspodjela**

Ako je broj podataka malen ( $N \leq 10$ ) normalna raspodjela modelira se Studentovom t-raspodjelom:



**Slika 16. T-raspodjela (crveno) u odnosu na pripadajuću normalnu raspodjelu (plavo)**

### 8.2. Procjene nesigurnosti tipa A

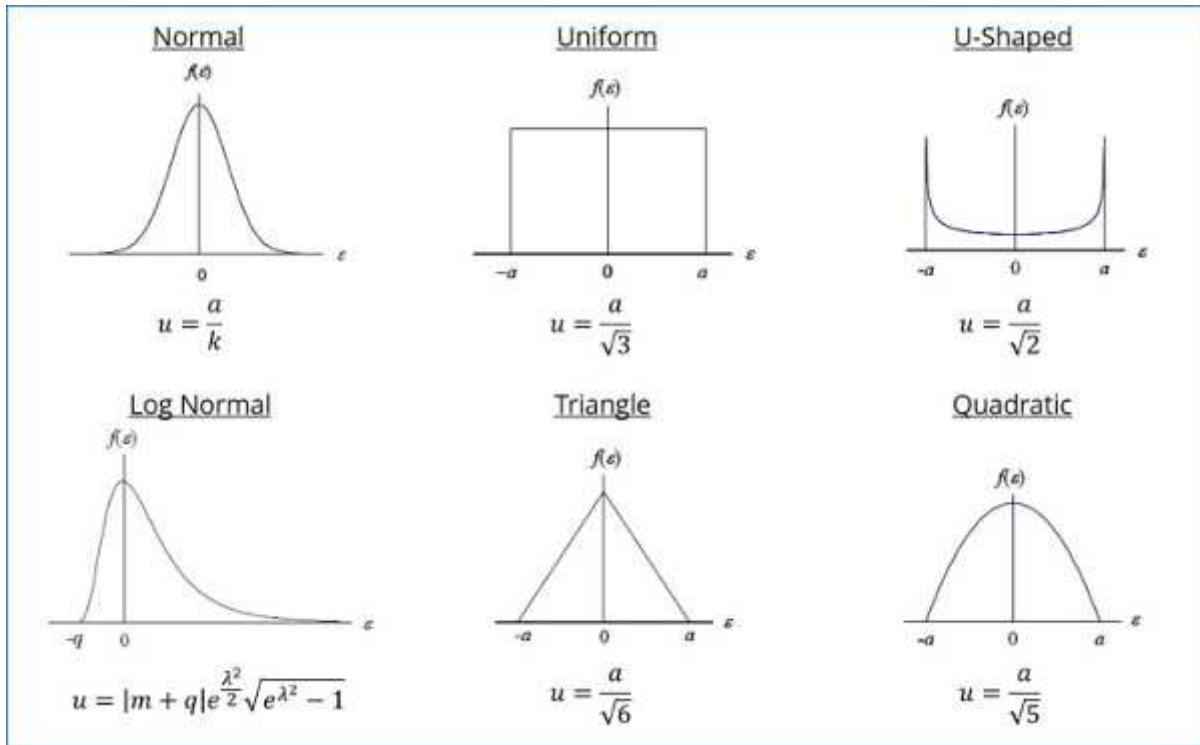
Ako se znanje o veličini utvrđuje ponavljanim mjerenjima, iz prosjeka rezultata se dobije medijan i prema rasipanju se procjeni statistička raspodjela rezultata takva procjena nesigurnosti se naziva procjena tipa A. Za veći broj mjerenja uzima se normalna raspodjela, dok se za manji broj mjerenja primjenjuje prikladna t-raspodjela. Kao primjer određivanja standardnog odstupanja tipa A dana je jednadžba za određivanje standardnog odstupanja temperature iz  $n$  mjerenja:

$$u(\bar{t}) = \sqrt{\frac{1}{n \times (n - 1)} \times \sum_{i=1}^n (t^{(i)} - \bar{t})^2} \quad (11)$$

### 8.3. Procjene nesigurnosti tipa B

Ako se nesigurnost procjenjuje na bilo koji način koji ne zahtijeva ponavljana mjerenja takva se procjena naziva procjena tipa B. Procjene tipa B uključuju procjene na temelju certifikata, podacima o mjernom uređaju, rezoluciji, klizanju ili procjeni iskusnog stručnjaka. Različite

statističke raspodjele mogu predstavljati nesigurnost tipa B, no pravokutna (uniformna) raspodjela je najčešća [4].



Slika 17 Često korištene kontinuirane statističke raspodjele

#### 8.4. Koeficijenti osjetljivosti

Koeficijent osjetljivosti je jedan od faktora pri proračunu mjerne nesigurnosti. Uzima se u obzir kad se mjerna veličina izračunava neposredno preko drugih izmjerenih veličina. Nesigurnost relativne vlažnosti ovisi o nesigurnosti izmjerene temperature, u tom slučaju faktor osjetljivosti,  $c_s$ , je parcijalna derivacija mjerne veličine o veličini preko koje se posredno mjeri [4].

Jednadžba relativne vlažnosti:

$$h = \frac{f(p_s, t_s) \times e(t_s)}{f(p, t) \times e(t)} \times \frac{p}{p_s} \quad (12)$$

Jednadžba relativne vlažnosti uz pretpostavku  $f(p_s, t_s) = f(p, t)$ :

$$h = \frac{e(t_s)}{e(t)} \times \frac{p}{p_s} \quad (13)$$



U pojednostavljenoj jednadžbi 4 veličine utječu na vrijednost relativne vlažnosti:  $t$ ,  $t_s$ ,  $p$  i  $p_s$ .

Koeficijenti osjetljivosti (parcijalne derivacije) u odnosu na te veličine su redom:

$$c_{s,t} = \frac{\delta h}{\delta t} = \frac{\delta h}{\delta e(t)} \frac{\delta e(t)}{\delta t} = \frac{-e(t_s) p}{e(t) p_s} \frac{\delta e(t)}{\delta t} = \frac{-h}{e(t)} \frac{\delta e(t)}{\delta t} \quad (14)$$

$$c_{s,t_s} = \frac{\delta h}{\delta t_s} = \frac{\delta h}{\delta e(t_s)} \frac{\delta e(t_s)}{\delta t_s} = \frac{1}{e(t) p_s} \frac{p \delta e(t_s)}{\delta t_s} = \frac{h}{e(t_s)} \frac{\delta e(t_s)}{\delta t_s} \quad (15)$$

$$c_{s,p} = \frac{\delta h}{\delta p} = \frac{\delta e(t_s)}{\delta t} \frac{1}{p_s} = \frac{\delta e(t_s) p}{\delta t p_s} \frac{1}{e(t) p_s} \frac{p}{p} = \frac{h}{p} \quad (16)$$

$$c_{s,p_s} = \frac{\delta h}{\delta p_s} = \frac{1}{p_s^2} \frac{e(t_s)}{e(t)} \times p = -\frac{h}{p_s} \quad (17)$$

[3]

## 9. PRAKTIČNI DIO RADA – UMJERAVANJE MJERILA ZA POTREBE INDUSTRIJE

### 9.1. Uvod

Umjeravanje se provelo na komercijalnom uređaju proizvođača Rotoronic montiranom pokaznom jedinicom hygropalm 2 i osjetnikom hygrokliplHK40. Mjerno područje umjeravnog uređaja je od -40 do 85 °C i 0 – 100 % RV.

Umjeravanje se izvelo prema internoj skripti Laboratorija za procesna mjerenja. Prvi dan umjerile su se 3 točke, rastućih vrijednosti temperature i relativne vlažnosti. Sljedeći dan umjerile su se još dvije točke: jedna da bi se izmjerila ponovljivost, a druga da bi se izračunao utjecaj histereze. Mjerenje svake točke provelo se uz minimalno 10 očitavanja u periodu od 10 minuta nakon potrebnog vremena uravnoteženja opisanog u poglavlju 6. Za etalon se koristio higrometar točke rosišta General Eastern M2 – koji se umjerava uspoređivanjem s primarnim etalom – generatorom vlažnosti u vlasništvu LPM-a.

Za određivanje relativne vlažnosti dovoljne su tri izmjerene vrijednosti: apsolutni tlak vlažnog zraka, temperatura vlažnog zraka i temperatura rosišta. Tlak zasićenja funkcija je isključivo temperature zraka (linija napetosti) te se između temperatura -100°C i 100°C jako dobro aproksimira Sonntagovom formulom:

$$\begin{aligned} e_w(t) = \exp & (6096.9385 \times (273.15 + t)^{-1} + 16.635794 \\ & - 2.711193 \times 10^{-2} \times (273.15 + t) \\ & + 1.673952 \times 10^{-5} \times (273.15 + t)^2 + 2.433502 \times \ln(273.15 \\ & + t)) \end{aligned} \quad (18)$$

Za izračun parcijalnog tlaka vodene pare i posljedično relativne vlažnosti također je potrebno odrediti faktor uvećanja. Faktor uvećanja korigira vrijednost parcijalnog tlaka kakav bi bio u smijesi idealnih plinova tj. parcijalni tlak izračunat Daltonovim zakonom. Aproksimira se Bögelovom formulom:

$$f_w(p, t) = 1 + \frac{10^{-4} e_w(t)}{273.15 + t} \times \left( 38 + 173 \times e^{-\frac{t}{43}} \right) \times \left( 1 - \frac{e_w(t)}{p} \right) + (6.39 + 4.28 \times e^{-\frac{t}{107}}) \times \left( \frac{p}{e_w} - 1 \right) \quad (19)$$

Tlak zasićenja pri tlaku i temperaturi rosišta iznosi:

$$e' = f_w(p_s, t_d) \times e_w(t_d) \quad (20)$$

Tlak zasićenja pri okolišnom tlaku i temperaturi iznosi:

$$e'_w(t) = f_w(p, t) \times e_w(t) \quad (21)$$

Relativna vlažnost iznosi:

$$h = \frac{e'}{e'_w} \quad (22)$$

## 9.2. Proračun mjerne nesigurnosti umjeravanog uređaja

Nesigurnost umjeravanog uređaja izračunala se po principima objašnjenim u poglavlju 8. Za potrebe proračuna koristila se Excel tablica Laboratorija za procesna mjerenja. Rezultati mjerenja prikazani su u sljedećoj tablici:

**Tablica 1 - Rezultati mjerenja**

Točka ( $U, t$ )	$t_d$ (°C)	$t$ (°C)	$h_{\text{etaona}}$ (%RV)	$h_{\text{umjeravanog uređaja}}$ (%RV)
(55 %RV, 23 °C) prvi dan	14.20	23.65	56.15	54.3
(70 %RV, 40 °C) uzlazno	33.91	40.92	69.19	68.5
(95 %RV, 60 °C)	59.15	60.29	96.07	97.7
(70 %RV, 40 °C) silazno	33.85	40.34	71.10	70.4
(55 %RV, 23 °C) drugi dan	13.99	23.31	56.52	55.5

### 9.3. Nesigurnost zbog mjerenja temperature rosišta

Utjecajni faktori pri proračunu nesigurnosti zbog utjecaja etalona su: nesigurnost tipa A određena umjeravanjem etalona (koja osim nesigurnosti ima vrijednost korekcije), utjecaj klizanja od zadnjeg umjeravanja, utjecaj stabilnosti, rezolucija etalona te utjecaj histereze. Standardna nesigurnost temperature rosišta za spomenuti etalon iznosi:  $u(t_d) = 0.056$  K

### 9.4. Nesigurnost uzrokovana umjeravanjem uređajem

Umjeravani uređaj generira nesigurnost tipa A koja iznosi:  $u(h_{DUT,mea}) = 0.013$  %RV te 3 dolje navedena izvora.

### 9.5. Ponovljivost

**Tablica 2 Tablica ponovljivosti za točku (23 °C, 55 %RV)**

	$T$ [°C]	$t_d$ [°C]	$h_{etalona}$ [%RV]	$h_{umjeravanog\ uređaja}$ [%RV]
1. dan	23.65	14.20	56.15	54.30
2. dan	23.31	13.99	56.52	55.52

Ponovljivost se izražava u jedinicama vrijednosti koja se mjeri i računa se kao odstupanje umjeravanog uređaja od etalona u dvije različite situacije (dva različita dana).

$$\delta h_{rep} = (h_{ETA,1} - h_{DUT,1}) - (h_{ETA,2} - h_{DUT,2}) \quad (23)$$

$$\delta h_{rep} = (56.15 - 54.3) - (56.52 - 55.52) = 0.85 \% \quad (24)$$

### 9.6. Rezolucija

Rezolucija se odnosi na umjeravani uređaj i u slučaju digitalnih pokazivača lako se određuje kao točnost zadnje znamenke. U slučaju analognih pokazivača rezolucija je razlika vrijednosti između dvije „crtice“. Ako se očitava vrijednost s analognog pokazivača ne preporučuje se procjenjivati vrijednost veličine između crtica nego odabrati kao očitano vrijednost crticu najbližu kazaljci [1]. Pri ovom umjeravanju rezolucija je 0.1 %RV

## 9.7. Histereza

Histereza se računa umjeravajući uređaj u istoj točki ali se jednom do te točke došlo iz stanja manjih vrijednosti relativne vlažnosti, a drugi put iz stanja većih vrijednosti relativne vlažnosti. Razlika odstupanja umjeravanog uređaja u odnosu na etalon.

**Tablica 3 Tablica histereze za točku (40 °C, 70 %)**

	$T [^{\circ}\text{C}]$	$t_d [^{\circ}\text{C}]$	$h_{\text{etalona}} [\% \text{RV}]$	$h_{\text{umjeravanog uređaja}} [\% \text{RV}]$
uzlazno	33.90	40.91	69.19	68.5
silazno	40.91	40.34	71.10	70.4

$$\delta h_{hys} = (h_{ETA,UZ} - h_{DUT,UZ}) - (h_{ETA,SIL} - h_{DUT,SIL}) \quad (25)$$

$$\delta h_{hys} = (69.193 - 68.5) - (71.102 - 70.4) = 0.01 \% \quad (26)$$

## 9.8. Nesigurnost zbog ostalih utjecaja i rezultat

Utjecaji koji su uračunati, a nisu još spomenuti su sljedeći:

- Nesigurnost uzrokovana mjerenjem tlaka
- Nesigurnost uzrokovana mjerenjem tlaka zasićenja
- Nesigurnost uzrokovana određivanjem tlaka vodene pare
- Nesigurnost uzrokovana određivanjem tlaka vodene pare pri zasićenju
- Nesigurnost faktora uvećanja mjerenog zraka
- Nesigurnost faktora uvećanja zasićenog zraka

**Tablica 4 Odstupanje i mjerna nesigurnost**

Referentna vrijednost (%RV)	Očitavanja umjeravanog instrumenta (%RV)	Korekcija očitavanja umjeravanog instrumenta (%RV)	Proširena mjerna nesigurnost (k=2) (%RV)
56.331	54.9	1.4	2.0
70.148	69.5	0.7	0.8
96.065	97.7	-1.6	1.3

Tablica uspoređuje vrijednosti relativne vlažnosti etalona i umjeravanog uređaja za 3 točke, redak (23 °C, 55 %RV) uprosječna je vrijednost dva mjerenja koja su se obavila ispitivanjem ponovljivosti, a redak (40 °C, 70 %RV) uprosječna je vrijednost dva mjerenja koja su se

obavila ispitivanjem histereze. Najveća mjerna nesigurnost izračunata je u točki (23 °C, 55 %RV) te iznosi 2.0 %RV.

## 10. ZAKLJUČAK

Kroz rad su se pokušale standardizirati metode umjeravanja različitih mjerila relativne vlažnosti. Kako je relativna vlažnost nužno ovisna o temperaturi i tlaku zraka očigledno je da se može izmjeriti onoliko precizno (ili nepreciznije) koliko se precizno može mjeriti svaka od tih varijabli. Iako u radu nisu dane upute kako mjeriti tlak i temperaturu jasno je da svaki mjeritelj relativne vlažnosti mora biti upućen u detalje mjerenja tih veličina. Regulacija vlažnosti važna je u industriji poluvodiča, inkubatorima, respiratorima, sterilizatorima, farmaceutskoj industriji i mnogim drugim. Koliko god standard bio ispoštovan mjerna nesigurnost će postojati i često je posao iskusnog mjeritelja da procjeni koji su utjecajni faktori bitni pri proračunu mjerne nesigurnosti. S većinom uređaja potrebno je postupati delikatno jer nestručno korištenje može oštetiti skupocjenu mjernu opremu.

Umjeravanje je pokazalo da umjeravani uređaj nije podložan utjecaju histereze ( $\delta h_{hys} = 0.01\%$ ), ali uz dovoljno dobru ponovljivost ( $\delta h_{rep} = 0.85\%$ ) ima (za svoju primjenu) zadovoljavajuću proširenu mjernu nesigurnost ( $U = 2.017\%RV$ ). Također se pokazalo da treba voditi računa o vrijednosti korekcije s obzirom da varira ovisno o stanju zraka.

**LITERATURA**

- [1] Calibration of hygrometers for the direct measurement of relative humidity, DKD-R 5-8; 2020
- [2] Antun Galović. Termodinamika 2. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2007.
- [3] CALIBRATION OF RELATIVE HUMIDITY METERS CP-VL02, FSB-LPM
- [4] J Lovell-Smith. The propagation of uncertainty for humidity calculations. 2009; 46(6):607
- [5] <https://e2bcal.com/humidity-salt-methods/>
- [6] Međunarodni mjeriteljski rječnik – Osnovni i opći pojmovi i pridruženi nazivi (VIM) - DRŽAVNI ZAVOD ZA MJERITELJSTVO, JCGM 200:2012