

# Projekt komore za umjeravanje mjerila relativne vlažnosti

---

Laješić, Filip

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:550993>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-26**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Filip Laješić**

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

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

Student:

Filip Laješić

Zagreb, 2016.

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

Zahvaljujem se svom mentoru Prof. dr. sc. Davoru Zvizdiću na stručnim savjetima i pomoći. Posebno bih se zahvalio Dr. sc. Danijelu Šestanu na velikoj pomoći i konzultacijama tijekom izrade ovog završnog rada.

Filip Laješić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



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

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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Filip Laješić** Mat. br.: 0035184677

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Projekt komore za umjeravanje mjerila relativne vlažnosti**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Design of the relative humidity test chamber**

Opis zadatka:

Za potrebe umjeravanja mjerila relativne vlažnosti u području od 5% do 95% potrebno je projektirati komoru za ispitivanje higrometara i pripadajući zračni sustav. Komora treba biti predviđena za smještaj u termostatiranu komoru ili higrostatiranu komoru većih dimenzija. Koristiti postojeću mjernu liniju i opremu u Laboratoriju za procesna mjerenja FSB-a.

U radu je potrebno:

- Izraditi pregled teorijskih podloga za rad generatora relativne vlažnosti uključivo i pregled empirijskih formula za određivanje i preračunavanje parametara vlažnog uzduha.
- Opisati postupak za ispitivanja i umjeravanje mjerila relativne vlažnosti uz korištenje generatora vlažnosti i termostatiranih komora.
- Projektirati komoru za ispitivanje mjerila relativne vlažnosti koja treba biti smještena u većoj komori te povezana s postojećim generatorom vlažnosti.
- Prikazati funkcionalnu shemu spajanja komore i crteže njezinih dijelova kao i funkcionalnu shemu cijelog sustava.

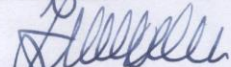
U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
25. studenog 2015.

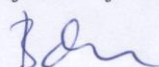
Rok predaje rada:  
**1. rok:** 25. veljače 2016  
**2. rok (izvanredni):** 20. lipnja 2016.  
**3. rok:** 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:  
**1. rok:** 29.2., 02. i 03.03. 2016.  
**2. rok (izvanredni):** 30. 06. 2016.  
**3. rok:** 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:

  
Prof. dr. sc. Davor Zvizdić

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Igor Balen

## SADRŽAJ

SADRŽAJ	1
POPIS TABLICA	4
POPIS OZNAKA	5
SAŽETAK	7
SUMMARY	8
1. UVOD	9
2. VLAŽAN ZRAK	10
2.1. Karakteristične veličine vlažnog zraka	11
2.1.1. Sadržaj vlage vlažnog zraka	11
2.1.2. Apsolutna vlažnost	12
2.1.3. Relativna vlažnost	12
3. MJERILA RELATIVNE VLAŽNOSTI	14
3.1. Utjecaj temperature i tlaka na mjerenje relativne vlažnosti	14
3.2. Vrste mjerila relativne vlažnosti	15
3.2.1. Mehanički higrometri s vlaknima	15
3.2.2. Mjerenje relativne vlažnosti zraka pomoću rosišta	16
3.2.3. Psihrometri	17
3.2.4. Kapacitativni pretvornici vlage	18
3.2.5. Otpornički pretvornici vlage	19
3.2.6. Elektrolitski pretvornici vlage	20
3.2.7. Pretvornici vlage sa samozagrijavanjem	20
3.2.8. Piezoelektrički pretvornici vlage	21
3.2.9. Određivanje vlage mjerenjem apsorpcije infracrvenog zračenja	21
4. GENERATORI VLAŽNOSTI	23
4.1. Solne kupke	23
4.2. Generatori vlažnosti s dvije struje	23
4.3. Generatori vlažnosti s dva tlaka	24
4.4. Dvotemperaturni generatori vlažnosti	25
4.5. Generator vlažnosti s termostatiranom komorom	26
5. Metode umjeravanja	28
5.1. Metoda umjeravanja mjerenjem točke rosišta i ispitne temperature	28
5.2. Metoda umjeravanja generiranjem relativne vlažnosti	29
6. Mjerna nesigurnost	31

---

6.1. Osnovno o mjernoj nesigurnosti	31
6.2. Temeljno statistički nazivi i pojmovi	32
6.3. Određivanje standardne mjerene nesigurnosti	34
6.3.1. Računanje standardne nesigurnosti metodom A	34
6.3.2. Računanje standardne nesigurnosti metodom B	35
6.3.3. Računanje standardne nesigurnosti izlazne veličine	37
6.3.4. Određivanje proširene mjerene nesigurnosti	37
7. Opis cjelovitog sustava za umjeravanje higrometara relativne vlažnosti zraka	39
7.1. Mala ispitna komora	40
7.3. Izmjenjivač	41
7.4. Konstrukcija izmjenjivača topline	45
7.5 Prototipna ispitna komora	45
7.6. Prednosti i nedostaci prototipne komore	48
8. ZAKLJUČAK	49
LITERATURA	50
PRILOZI	51

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Ovisnost tlaka zasićenja vodene pare o temperaturi .....	13
Slika 2. Mehanički higrometar s vlaknima.....	15
Slika 3. Shema uređaja za mjerenje relativne vlažnosti zraka pomoću rosišta .....	17
Slika 4. Psihrometar .....	18
Slika 5. Kapacitativni pretvornik vlage.....	19
Slika 6. Otpornički pretvornik vlage s valjkastim izolatorom .....	20
Slika 7. Piezoelektrički pretvornik vlage .....	21
Slika 8. Shema mjerila relativne vlažnosti na principu infracrvenog zračenja .....	22
Slika 9. Generator vlažnosti s dvije struje.....	24
Slika 10. Generator vlažnosti s dva tlak.....	25
Slika 11. Generator vlažnosti sa termostatiranom komorom .....	27
Slika 12. Komora za umjeravanje s mjerenjem temperature točke rose i ispitne temperature	29
Slika 13. Umjeravanje generiranjem relativne vlažnosti u termostatiranoj komori.....	30
Slika 14. Umjeravanje generiranjem relativne vlažnosti kupki .....	30
Slika 15. Pravokutna razdioba.....	36
Slika 16. Funkcionalna shema spajanja u sustav umjeravanja.....	40
Slika 17. Mala ispitna komora.....	41
Slika 18. Zavojnica.....	45
Slika 19. Prototipna komora u izometriji .....	47
Slika 20. Prototipna komora i izmjenjivač .....	47



---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Faktor proširenja za normalnu i pravokutnu razdiobu ..... 38  
Tablica 2. Rezultati proračuna zavojnice ..... 44

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$A$	$m^2$	površina izmjene topline
$c_p$	J/kg K	specifični toplinski kapacitet
$D_{SR}$	m	srednji promjer zavojnice
$d$	m	promjer zavojnice
$d_v$	m	vanjski promjer cijevi
$d_u$	m	unutarnji promjer cijevi
$k$	W/m <sup>2</sup> K	koeficijent prolaza topline
$l_0$	m	unutarnji promjer cijevi
$M$	kg/kmol	molarna masa
$M_z$	kg/kmol	molarna masa zraka
$M_z$	kg/kmol	molarna masa vodene pare
$m_w$	kg	ukupna masa vode (vlage)
$m_z$	kg	masa suhog zraka
$P$	m	korak zavojnice
$p$	Pa	sveukupni tlak smjese
$p_c$	Pa	tlak u ispitnoj komori
$p_d$	Pa	parcijalni tlak vodene pare u vlažnom zraku
$p_s$	Pa	parcijalni tlak vodene pare zasićenog vlažnog zraka
$p_{sl}$	Pa	parcijalni tlak vodene pare zasićenog zraka preko ledene površine
$p_z$	Pa	parcijalni tlak suhog zraka u vlažnom zraku
$\bar{q}$	-	aritmetička sredina
$q_v$	m <sup>3</sup> /s	volumni protok
$R_m$	J/mol K	opća plinska konstanta
$R_d$	J/mol K	individualna plinska konstanta vodene pare
$R_z$	J/mol K	individualna plinska konstanta suhog zraka
$R_u$	m	unutarnji polumjer cijevi
$R_v$	m	vanjski polumjer cijevi
$s$	-	standardno odstupanje
$s^2$	-	varijancija
$s(\bar{q})$	-	standardno odstupanje srednje vrijednosti
$s^2(\bar{q})$	-	varijancija srednje vrijednosti
$\vartheta_c$	°C	temperatura komore
$\vartheta_{ok}$	°C	temperatura okoliša
$\vartheta_s$	°C	temperatura točke rose
$\vartheta_{sc}$	°C	temperatura točke rose vlažnog zraka za ishlapljivanje preko ledene površine

---

$t_w$	$^{\circ}\text{C}$	temperatura vode
$u$	-	standardna nesigurnost
$w$	m/s	brzina strujanja
$\alpha$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	koeficijent prijelaza topline
$\alpha_u$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	koeficijent prijelaza topline na unutarnjoj strani stijenke
$\alpha_v$	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	koeficijent prijelaza topline na vanjskoj strani stijenke
$\beta$	$\text{K}^{-1}$	koeficijent toplinskog širenja
$\lambda$	$\text{W}/\text{m K}$	toplinska provodnost
$\nu$	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	kinematička viskoznost
$\rho_d$	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	apsolutna vlažnost
$\rho_z$	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	gustoća zraka
$\varphi$	%	relativna vlažnost zraka
$Gr$	-	<i>Grashofova</i> značajka
$Nu$	-	<i>Nusseltova</i> značajka
$Pr$	-	<i>Prandtlova</i> značajka
$Re$	-	<i>Reynoldsova</i> značajka

**SAŽETAK**

U sklopu ovog rada dane su teorijske podloge vezane uz proces umjeravanja mjerila relativne vlažnosti zraka, kao i konstrukcijsko rješenje za izradu pripadne komore za umjeravanje. Komora za umjeravanje dimenzionirana je za smještanje triju higrometara relativne vlažnosti zraka, jednog referentnog te dvaju ispitivanih. Komora se napaja zrakom iz generatora vlažnosti, poznatog injišta/rosišta. Prije ulaska u komoru zrak prolazi kroz izmjenjivač topline kojim se zagrijava na željenu temperaturu. Regulacijom temperature te injišta/rosišta zraka ostvaruje se željena relativna vlažnost. Komora za umjeravanje i pripadni izmjenjivač topline konstruirani su tako da ih je moguće smjestiti unutar klimatizirane komore većeg volumena ili potopiti u radnu tekućinu termostatorane kupke. Uz konstrukcijsko rješenje komore, u radu je prikazana i funkcionalna shema njenog spajanja na sustav za umjeravanje.

Ključne riječi: relativna vlažnost, komora za umjeravanje mjerila relativne vlažnosti

**SUMMARY**

This project gives theoretical background for calibration of relative humidity instruments and describes design and construction of a small chamber which is used for calibration of relative humidity instruments.

The described calibration chamber is suitable for accommodation of three hygrometers, one reference and two instruments under test. The chamber is supplied from humidity generator which provides air of known dew/frost point temperature. Prior to entering the chamber, supplied air passes through the coiled tube heat exchanger, where it is heated to the desired test temperature. The required relative humidity of air flowing through the calibration chamber is adjusted by controlling the air temperature and dew/frost point. Calibration chamber and related heat exchanger are designed to be accommodated inside climatic chamber of larger volume or immersed into thermostated bath liquid. The functional diagram describing connection of the chamber to the calibration system is also given in this work.

Key words: relative humidity, test chamber

## **1. UVOD**

Tema završnog rada je konstruiranje komore za umjeravanje mjerila relativne vlažnosti zraka. Rad također sadrži pregled postupaka koji se koriste prilikom predmetnih umjeravanja.

Procesi s vlažnim zrakom su veoma važni u mnogim područjima strojarstva i tehnike kao što su klimatizacija, tehnika sušenja i ovlaživanja. Naime, prisutnost ili odsutnost vodene pare u vlažnom zraku uvelike utječu na fizikalne, kemijske i biološke procese zbog čega je i njihova regulacija izrazito bitna. Regulacije parametara koje se najčešće provode su upravo regulacija protoka, temperature i vlažnosti. Mjerni instrumenti koji se koriste za mjerenje relativne vlažnosti zraka nazivaju se higrometri. Postoji velik broj vrsta ovakvih uređaja, koji za mjerenje relativne vlažnosti koriste razne principe. U odnosu na druga mjerenja, točnost mjerenja relativne vlažnosti nije velika i u svakodnevnoj se primjeni relativno rijetko postižu točnosti veće od  $\pm 2\%$ . Kako bi ostvarili precizno mjerenje relativne vlažnosti, potrebni su nam uređaji koji osiguravaju uvjete za precizna umjeravanja odnosno ispitivanja higrometra. Upravo takvi uređaji, koje nazivamo generatorima vlažnosti, imaju mogućnost stvaranja uvjeta pogodnih za određivanje odstupanja ispitivanih higrometra. Generator vlažnosti zajedno s ispitnom komorom dva su osnovna uređaja koji sačinjavaju mjernu liniju za umjeravanje higrometara.

---

## 2. VLAŽAN ZRAK

Vlažan zrak predstavlja dvojni (binarnu) smjesu suhog zraka i vlage. Suhi zrak se kao sudionik pojavljuje samo u plinovitom obliku, a vlaga kao drugi sudionik javlja u plinovitom, kapljevitom pa čak i u krutom agregatnom stanju. Temperaturno područje, unutar kojeg se koristi vlažni zrak, proteže se između  $-40$  i  $50^{\circ}\text{C}$ . No, u tehnici sušenja javljaju se i više temperature, koje mogu biti u do  $100^{\circ}\text{C}$ . Kako je stanje suhog zraka u kritičnoj točki  $-141^{\circ}\text{C}$  i  $37,66$  bar ona leži mnogo ispod navedenih temperatura, što znači da se suhi zrak može tretirati kao idealni plin. Ako se vlaga u binarnoj smjesi javlja u obliku vodene pare, tada je, prema *Daltonovom* zakonu, sveukupni tlak  $p$  smjese, jednak zbroju parcijalnog (sudioničkog) tlaka  $p_z$  suhog zraka i parcijalnog tlaka  $p_d$  vodene pare.

$$p = p_z + p_d \tag{1}$$

## 2.1. Karakteristične veličine vlažnog zraka

### 2.1.1. Sadržaj vlage vlažnog zraka

Za opisivanje sastava i stanja vlažnog zraka usima se sadržaj vlage  $x$  koji se definira:

$$x = \frac{m_w}{m_z} \quad (2)$$

gdje je:

$m_w$ - ukupna masa vode (vlage), [ $kg_w$ ]

$m_z$ - masa suhog zraka, [ $kg_z$ ]

Tako dugo dok je parcijalni tlak  $p_d$  vodene pare manji od tlaka zasićenja  $p_s$  pri istoj temperaturi vlažnog zraka, vlaga je u zraku sadržana u obliku pregrijane vodene pare pa se parcijalni tlakovi vodene pare i suhog zraka mogu računati prema jednadžbi stanja koja vrijedi za idealne plinove.

Jednadžba stanja za vodenu paru u mješavini vlažnog zraka volumena  $V$  i temperature  $T$ :

$$p_d \cdot V = m_d \cdot R_d \cdot T \quad (3)$$

a za suhi zrak jednadžba stanja glasi:

$$p_z \cdot V = m_z \cdot R_z \cdot T \quad (4)$$

Međusobnim dijeljenjem gornjih jednadžbi dobiva se:

$$\frac{m_d}{m_z} = \frac{R_z \cdot p_d}{R_d \cdot p_z} \quad (5)$$

Veličine  $R_z$  i  $R_d$  su individualne plinske konstante suhog zraka i vodene pare, koje se mogu izračunati preko opće plinske konstante  $R_m$  i pripadajuće molarne mase  $M$ ;  $R = \frac{R_d}{M}$ , pa se gornju jednadžbu može izraziti u obliku:

$$x_d = \frac{M_d \cdot p_d}{M_z \cdot p_z} \quad (6)$$

Molarna masa zraka je  $M_z=28,96$  kg/kmol, a vodene pare  $M_d=18$  kg/kmol, tako da se nakon uvrštavanja vrijednost dobiva:

$$x_d = 0,622 \cdot \frac{p_d}{p_z} \quad (7)$$

Parcijalni tlak  $p_z$  se dobiva iz jednadžbe (1):

$$p_z = p - p_d \quad (8)$$

te uvrštavanjem iste u jednadžbu (7) slijedi:

$$x_d = 0,622 \cdot \frac{p_z}{p - p_z} \quad (9)$$

Iz gornje jednadžbe može se izraziti parcijalni tlak vodene pare:

$$p_d = \frac{p \cdot x_d}{0,622 + x_d} \quad (10)$$



Postigne li parcijalni tlak vodene pare  $p_d$ , za zadanu temperaturu vlažnog zraka, pripadajući tlak zasićenja  $p_s$ , tada vlažni zrak postaje zasićen. Stanja vodene pare u vlažnom zraku postiglo je liniju rošenja, vodena para više nije pregrijana nego suhozasićena. Sadržaj vlage  $x_s$  zasićenog zraka dobije se iz jednadžbe (9) ako se umjesto parcijalnog tlaka  $p_d$  uvrsti parcijalni tlak zasićenja  $p_s$ .

$$x_s = 0,622 \cdot \frac{p_s}{p-p_s} \quad (11)$$

### 2.1.2. Apsolutna vlažnost

Apsolutna vlažnost definira se kao odnos mase  $m_d$  sadržane vodene pare i volumena  $V$  vlažnog zraka

$$\rho_d = \frac{m_d}{V} \quad (12)$$

Kako se vodena para i suhi zrak ponašaju kao idealni plinovi tada prema *Daltonovom zakonu* slijedi:

$$p_d \cdot V = m_d \cdot R_d \cdot T \quad (13)$$

Iz gornjih dviju jednadžbi dobiva se:

$$\rho_d = \frac{p_d}{T \cdot R_d} \quad (14)$$

Za zadanu temperaturu  $T$  vlažnog zraka apsolutna vlažnost je najveća ako se radi o zasićenom vlažnom zraku, tj. ako je parcijalni tlak vodene pare jednak tlaku zasićenja  $p_d(\vartheta) = p_s(\vartheta)$ , pa je apsolutna vlažnost:

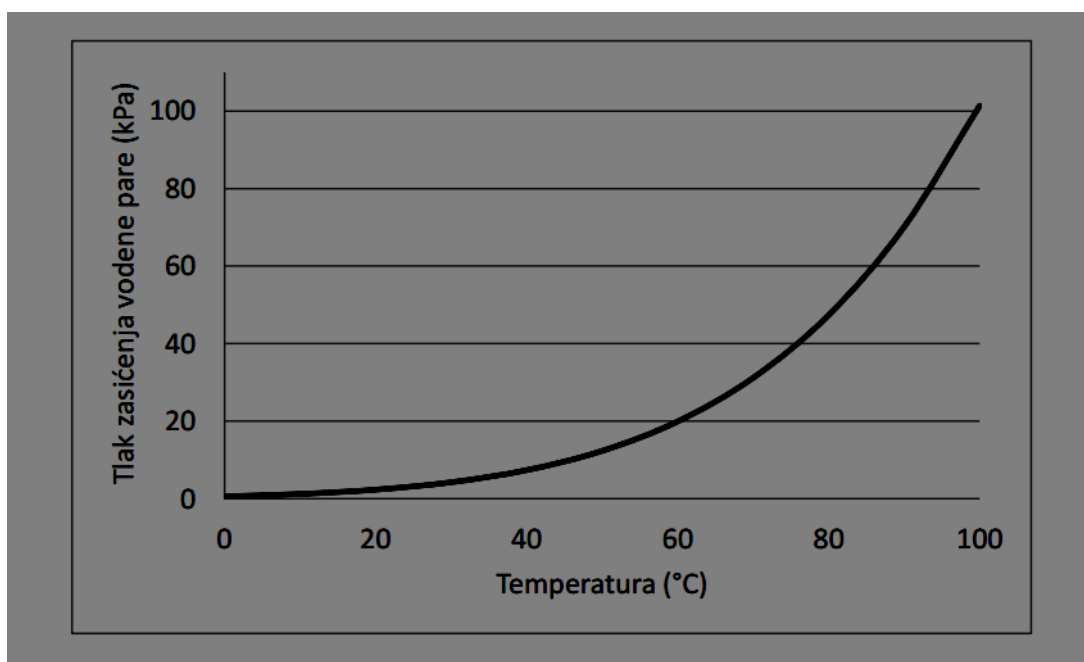
$$\rho_s = \frac{p_s}{T \cdot R_d} \quad (15)$$

### 2.1.3. Relativna vlažnost

Veličina  $\varphi$  označuje se kao *relativna vlažnost*:

$$\varphi = \frac{p_d(T)}{p_s(T)} = \frac{q_d(T)}{q_s(T)} \quad (16)$$

Stoga relativna vlažnost predstavlja omjer između parcijalnog tlaka vodene pare pri temperaturi  $T$  i parcijalnog tlaka zasićenja za istu temperaturu. Relativna vlažnost se može nalaziti u intervalu  $0 \leq \varphi \leq 1$ . Ako je  $\varphi = 0$ , govorimo od suhom zraku, a ako je  $\varphi = 1$  onda je vlažni zrak zasićen. Stoga se relativna vlažnosti ima smisao sam u području nezasićenog zraka.



Slika 1. Ovisnost tlaka zasićenja vodene pare o temperaturi

### 3. MJERILA RELATIVNE VLAŽNOSTI

U ovom poglavlju biti će navedene vrste mjerila relativne vlažnosti i principi rada svakog od njih također će biti objašnjeno kakav je utjecaj temperature i tlaka na mjerenje relativne vlažnosti.

#### 3.1. Utjecaj temperature i tlaka na mjerenje relativne vlažnosti

Kada je u pitanju mjerenje relativne vlažnosti, važnost određivanja ispravne temperature izrazito je bitna jer pogrešna pretpostavka temperature može dovesti do velikih pogrešaka te mjerenje može izgubiti svaki smisao. Najveći izvor nesigurnosti pri mjerenju vlažnosti su temperaturni gradijenti u ispitnom prostoru. Svi higrometri imaju temperaturnu zavisnost. Neki instrumenti poput psihrometra ili kondenzacijskih higrometra utjecaj temperature je malen, dok kod instrumenata s elektroničkim sensorima utjecaj temperature je značajan. Mora se spomenuti da ovi uređaji u sebi imaju temperaturnu kompenzaciju. Pojava kondenzacije također uzrokuje greške prilikom mjerenja te da bi se te greške izbjegle i kao zaštitu od kondenzacije dijelovi ovih uređaja se griju. Promjenom temperature dolazi do absorpcije i desorpcije vlage u materijalu senzora, koja može dovesti do velike greške prilikom mjerenja na niskom temperaturama rošenja. Kao što je već spomenuto temperatura utječe na tlak zasićenja vodene pare, a time i na relativnu vlažnost. Kao primjer na temperaturi od 30 °C i relativne vlažnosti  $\varphi=50\%$ , pri promjeni temperature rosišta od  $\pm 1^\circ\text{C}$ , može doći do pogreške od  $\pm 3\%$  relativne vlažnosti.

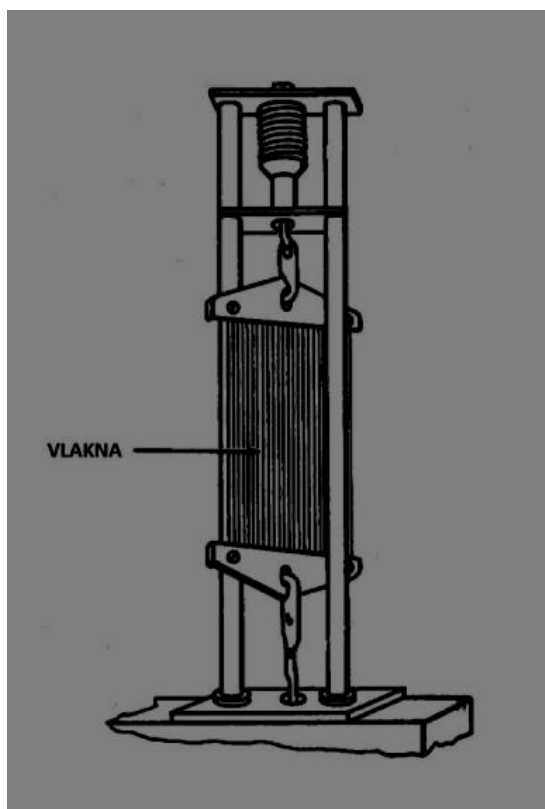
Uz temperaturu značajan utjecaj na rezultate mjerenja ima i tlak. Budući da sva mjerenja vlažnosti proizlaze iz mjerenja tlaka vodene pare, svaka promjena ukupnog tlaka u sustavu ima utjecaj na mjerenja relativne vlažnosti. Promjenom ukupnog tlaka mijenjaju se i parcijalni tlakovi sudionika vlažnog zraka i obrnuto. Važno je predvidjeti utjecaj promjene tlaka pri mjerenju vlažnosti. Kako je relativna vlažnost definirana kao omjer parcijalnog tlaka vodene pare pri temperaturi  $\vartheta$  i parcijalnog tlaka zasićenja za istu temperaturu  $\vartheta$ , pri promjeni apsolutnog tlaka vlažnog zraka mijenja se i parcijalni tlak vodene pare. Ako se apsolutni tlak udvostruči isto tako će se udvostručiti i parcijalni tlak vodene pare, a tlak zasićenja ostane nepromijenjen (zbog konstantne temperature), relativna vlažnost će se udvostručiti.

### 3.2. Vrste mjerila relativne vlažnosti

Relativna vlažnost se može mjeriti direktno korištenjem instrumenata ili indirektno preračunavanjem izmjerenih temperatura vlažnog zraka i temperature rošenja. Postoji mnogo metoda i vrsti higrometra za mjerenje vlažnosti. U ovom ćemo poglavlju nabrojati samo neke metode.

#### 3.2.1. Mehanički higrometri s vlaknima

Mehanički higrometri koriste širenje i sužavanje organskih materijala s promjenom vlažnosti. Kao senzor koristi se skup od desetak vlakana koja su prednapeta putem opruge. Promjena duljine uslijed promjena relativne vlažnosti pokreće mehanizam s kazaljkom koja na skali pokazuje relativnu vlažnosti. Prednost su mu što ne treba baterijsko napajanje i niska cijena. Nedostatci su mu sporo prikazivanje rezultata pri promjeni vlažnosti te ih lako poremete vibracije. Koriste se pri sobnim temperaturama, očitavanje relativne vlažnosti je u intervalu od 20-80% s greškom mjerenja 5-15%.



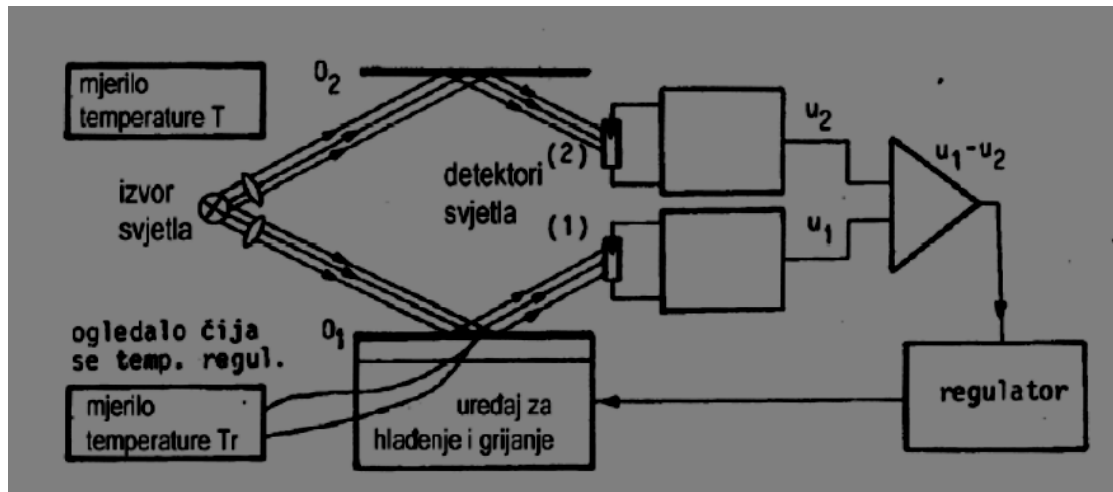
Slika 2. Mehanički higrometar s vlaknima

### 3.2.2. Mjerenje relativne vlažnosti zraka pomoću rosišta

Pri relativnoj vlažnosti manjoj od 100%, tlaku vodene pare  $p_d$  na temperaturi  $\vartheta$  odgovara  $\vartheta_s < \vartheta$  pri kojoj tlak  $p_d$  predstavlja tlak zasićenja vodene pare  $p_s(\vartheta_s)$ . Određivanje temperature rosišta možemo računati prema:

$$\varphi = \frac{p_s(\vartheta_s)}{p_s(\vartheta)} \quad (17)$$

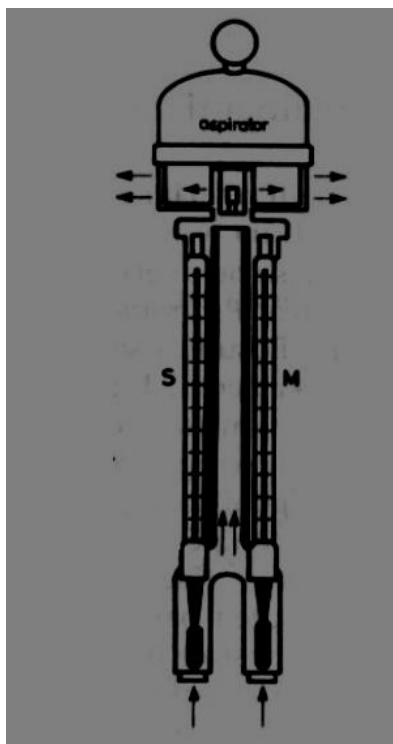
pri čemu podatke za  $p_s(\vartheta_s)$  i  $p_s(\vartheta)$  očitavamo iz tablice ovisnosti tlaka zasićenja vodene pare o temperaturi. Uređaj radi na principu dva ogledala  $O_1$  i  $O_2$  preko kojih se reflektira svjetlost na detektore svjetla (1) i (2). Na ogledalu  $O_1$  je postavljen uređaj za mjerenje temperature i uređaj za grijanje i hlađenje. Ako su oba ogledala na istoj temperaturi onda je jednak intenzitet reflektirane svjetlosti na detektorima svjetla koji pokazuju jednak napon  $u_1$  i  $u_2$  što dovodi do uključivanja uređaja za hlađenje na ogledalu  $O_1$  pomoću regulatora. Kada temperatura ogledala dostigne vrijednost temperature rošenja  $\vartheta_s$  dolazi do formiranja kapljica vode na njegovoj površini koja smanjuje intenzitet reflektirajućeg svjetla na detektoru (1) što uzrokuje da je  $u_2 > u_1$ , nakon čega se uključuje grijač pomoću kojeg ispare kapljice vode na ogledaju  $O_1$  i ponovo se uspostavlja jednak napon  $u_2 = u_1$ . Uz poznatu temperaturu okoliša  $\vartheta$  i temperaturu rošenja  $\vartheta_s$ , iz tablica ovisnosti tlaka zasićenja vodene pare o temperaturi očitavamo vrijednost za  $p_s(\vartheta_s)$  i  $p_s(\vartheta)$  i izračunamo relativnu vlažnost prema izrazu (17). Prednost ovog načina mjerenja je velika točnost, dok su nedostaci visoka cijena, velika potrošnja energije i osjetljivost na čistoću ogledala.



Slika 3. Shema uređaja za mjerenje relativne vlažnosti zraka pomoću rosišta

### 3.2.3 Psihrometri

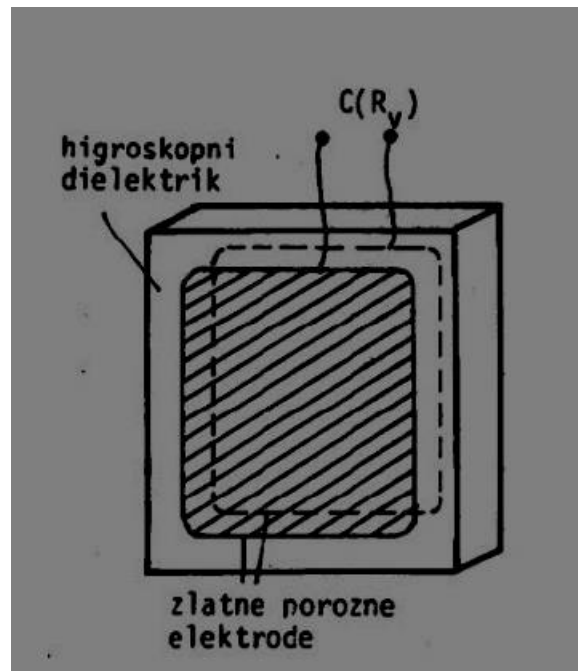
Uređaj koji mjeri relativnu vlažnost putem dva vrlo precizna termometra naziva se psihrometar. Dvije temperature koje psihrometar mjeri su temperaturu granice hlađenja  $\vartheta_{SH}$  i temperaturu zraka  $\vartheta_1$ . Srebrna kuglica jednog termometra presvučena je krpom koja je natopljena destiliranom vodom te ona predstavlja vlažno tijelo kojemu se mjeri temperatura. Drugi termometar mjeri temperaturu okolišnog zraka. Uvjet koji je potrebno zadovoljiti prilikom mjerenja u upravo da je proces adijabatski, odnosno mjerenje mora biti bez izmjene topline. To se naime postiže na način da se oba termometra umeću u zaštitne cijevi. Na ovaj način osigurali smo zaštitu od prijenosa topline zračenjem. Prednosti ovih uređaja u upravo da su jednostavni, jeftini, otporni na visoke temperature, imaju mogućnost očitavanja u širokom intervalu vlažnosti. Glavni nedostatak je upravo u tome što se rezultati moraju preračunavati, što znači da ne dobivamo rezultate u obliku relativne vlažnosti već u funkciji temperatura i tlaka. Poznavanje tih temperatura i apsolutnog tlaka određeno je stanje vlažnog zraka. Imaju mogućnost mjerenja relativne vlažnosti u intervalu od 5-100% u temperaturnom intervalu od 0 do +100 °C. Greška koja se javlja prilikom mjerenja može varirati od 2 do 5%. Primjer psihrometra je prikazan na slici 4.



Slika 4. Psihrometar

### 3.2.4. Kapacitativni pretvornici vlage

Kao dielektrik koristi se higroskopni materijal kojem se uslijed apsorpcije vlage bitno mijenjaju dielektrička svojstva, najčešće su to higroskopni polimeri debljine 8-12  $\mu\text{m}$  dimenzija 12x12 mm na čije stranice je naparen tanki sloj zlata čime se formira pločasti kondenzator. Raspon mjerenja relativne vlažnosti je od 5 – 90% u temperaturnom području od 0-50 °C. Kapacitativni pretvornik vlage je prikazan na slici 5.

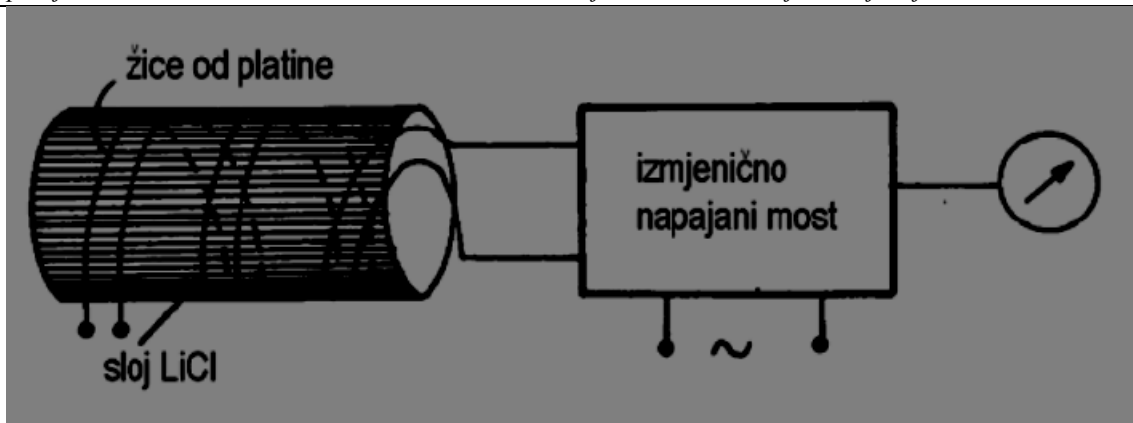


Slika 5. Kapacitativni pretvornik vlage

### 3.2.5 Otpornički pretvornici vlage

Higoskopni materijali (*litijev klorid -  $LiCl$ , polistiren, aluminijev oksid  $Al_2O_3$* ) imaju sposobnost upijanja vlage iz zraka, pri čemu im se bitno mijenja električni otpor. Konstrukcija im je izrazito jednostavna i sastoji se od izolatorskog valjkastog tijela oko kojeg su namotane dvije žive od platine koje se međusobno ne dodiruju te je po cijelom površinskom sloju nanesen premaz *LiCl*. Reakcija je sljedeća: povećanjem vlažnosti smanjuje se otpor prolaza struje kroz žica od platine, također otpor im se povećava smanjenjem vlažnosti. Otpornički pretvornik vlage s valjkastim izolatorom prikazan je na slici 6.





Slika 6. Otpornički pretvornik vlage s valjkastim izolatorom

Također postoje i razne druge varijante otporničkih pretvornika vlage, možda najpoznatiji je upravo pločasti pretvornik. Na supstrat su nanoseni vodiči preko koji je postavljen sloj higroskopskog materijala. Ovdje razlikujemo dvije izvedbe, prva u kojoj se kao higroskopsni materijal koristi otopina  $LiCl$  te druga u kojoj se kao higroskopsni materijal koristi polistiren tretiran sumpornom kiselinom. Otpornički pretvornici vlage mjere relativnu vlažnost od 5-90% u temperaturnom intervalu od -30 do +60 °C s greškom mjerenja od 2 do 3 %.

### 3.2.6 Elektrolitski pretvornici vlage

Kao higroskopsni materijal koristi se fosforni pentoksid  $P_2O_5$  kroz koji se propušta istosmjerna struja. Vлага koja se tijekom procesa mjerenja apsorbira elektrolizom se rastavlja na kisik i vodik čime se povećava otpor pretvornika. Struja se smanji do trenutka kada se izjednače brzina elektrolize i brzina apsorpcije vlage iz zraka. Pri većoj relativnoj vlažnosti zraka je i struja, pri kojoj se uspostavlja ravnotežno stanje, jača pa se vlažnost zraka očitava pomoću ampermetara. Ovi uređaji za mjerenje relativne vlažnosti su posebno pogodni kada je riječ o mjerenju malih količina vlage (1 ppm). Točnost im je oko 10% pri mjerenju relativne vlažnosti od 1 ppm, kod većih iznosa relativne vlažnosti točnost im raste na 5%. Vrijeme odaziva je oko 1 min.

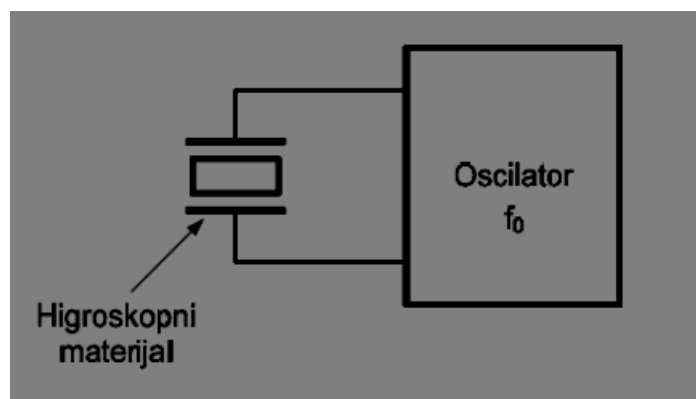
### 3.2.7. Pretvornici vlage sa samozagrijavanjem

Ovi pretvornici vlage temelje se na pretvornicima s  $LiCl$ . Pretvornik se napaja s višim naponom prilikom čega dolazi do zagrijavanja sloja  $LiCl$  na temperaturu višu od temperature okoliša. Uslijed zagrijavanja isparava vlaga iz  $LiCl$  te se povećava otpor i smanjuje struja kroz pretvornik. Temperatura pretvornika dostiže konstantnu vrijednost pri kojoj se uspostavlja ravnoteža između brzine isparavanja i upijanja vlage iz okoline. Temperatura ravnotežnog

stanja je viša pri višoj relativnoj vlažnosti zraka pa se vlažnost očitava pomoću temperaturnog senzora koji mjeri temperaturu zagrijanog sloja  $LiCl$ .

### 3.2.8. Piezoelektrički pretvornici vlage

Sastoji se od piezoelektričkog kristala obloženog slojem higroskopskog materijala. Pretvornik je spojen u krug oscilatora koji oscilira na rezonantnoj frekvenciji kristala. Pri povećanju vlažnosti se uslijed apsorpcije povećava masa pretvornika što uzrokuje smanjenje njegove rezonantne frekvencije. Relativna vlažnost se određuje mjerenjem promjene frekvencije. Mjerenje se provodi naizmjeničnim puštanjem suhog i vlažnog plina preko pretvornika i određivanjem razlike frekvencija. Uporaba im je ograničena samo na određivanje vlage u plinovima. Također nisu upotrebljivi za mjerenje vlage u plinovima koji bi tijekom mjerenja mogli stvoriti talog u pretvorniku. Primjer piezoelektričnog pretvornika vlage prikazan je na slici 7.

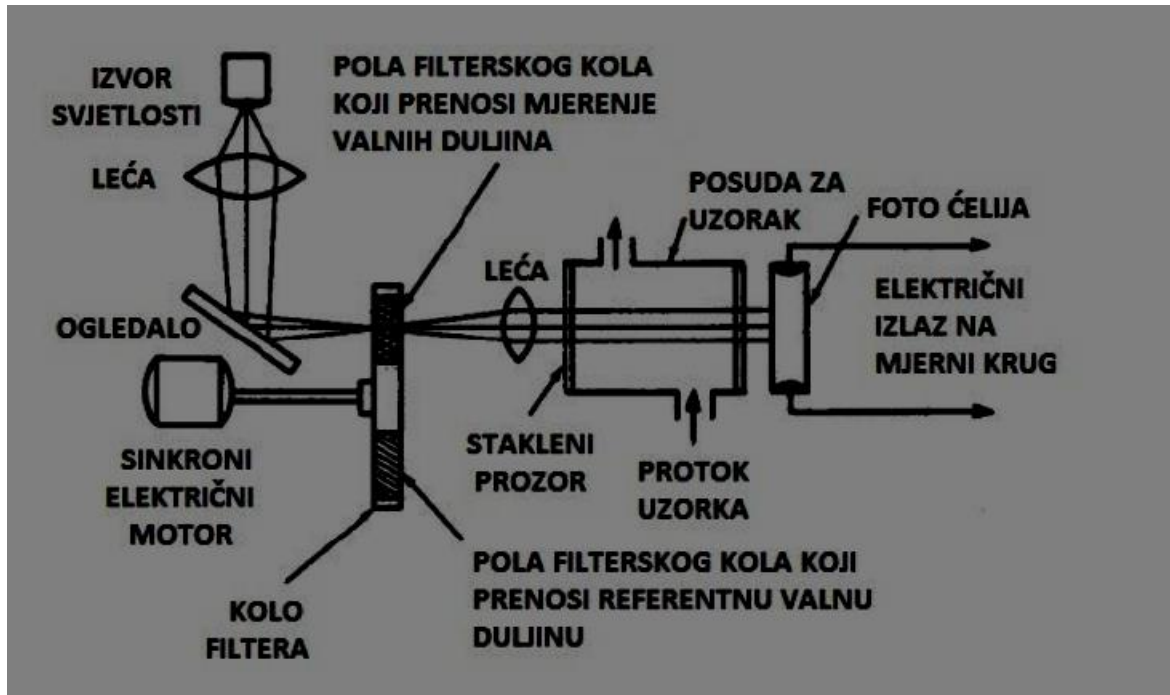


Slika 7. Piezoelektrički pretvornik vlage

### 3.2.9. Određivanje vlage mjerenjem apsorpcije infracrvenog zračenja

Uređaj se temelji na činjenici da voda intenzivno apsorbira infracrveno (IC) zračenje valnih duljina 1,43  $\mu\text{m}$  i 1,93  $\mu\text{m}$ . Princip rada ovog uređaja za mjerenje relativne vlažnosti je sljedeći. Infracrveno svjetlo prolazi kroz optički filter koji naizmjenice propušta referentnu i mjernu valnu duljinu. Infracrveno svjetlo referentne valne duljine voda slabo apsorbira za razliku od infracrvenog svjetla mjerne valne duljine. Na izlazu foto-osjetljivog detektora dobivaju se dva

impulsa, referentni i mjerni čija se amplituda razlikuje zbog različitom sadržaju vlage. Ova metoda je ograničena na prozirne tekućine i plinove. Naime, niti u plinovima ni u prozirnim tekućina ne smiju se nalaziti dodatni elementi ili komponente koje bi zbog svojih drugačijih apsorpcijskih svojstava narušili integritet ispitivanja.



Slika 8. Shema mjerila relativne vlažnosti na principu infracrvenog zračenja

## 4. GENERATORI VLAŽNOSTI

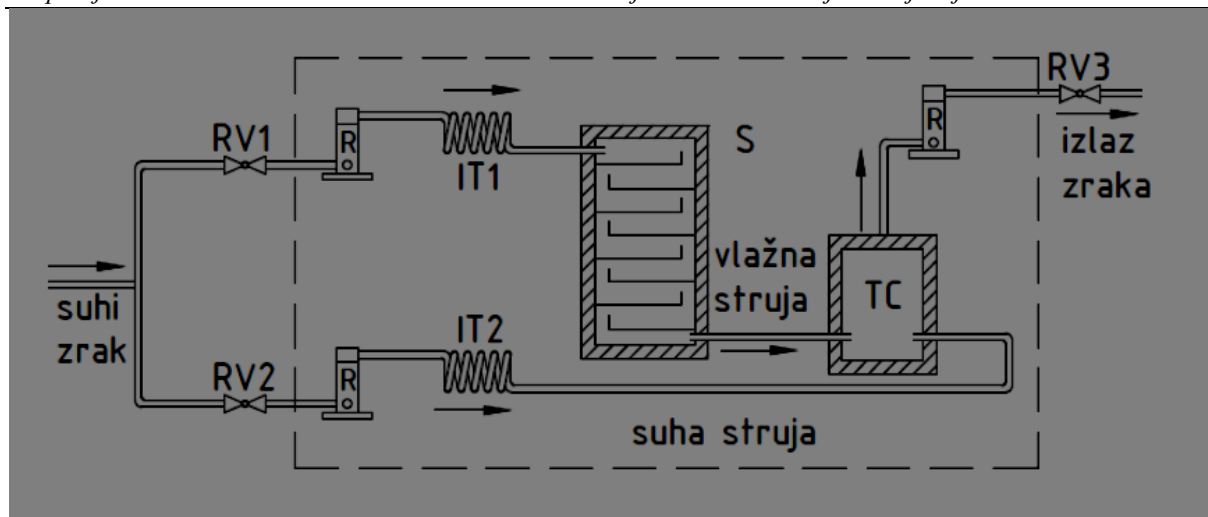
Uređaji koji proizvode točno definiranu vlažnost zraka u komorama nazivaju se generatori vlažnosti. Koriste se za precizno umjeravanje higrometra. Način umjeravanja je sljedeći: higrometar koji se nalazi u ispitnoj komori pokazuje određenu relativnu vlažnost, taj se podatak uspoređuje s relativnom vlažnosti koja je definirana pomoću generatora vlažnosti. U ovom ćemo poglavlju navesti neke od osnovnih vrsta generatora vlažnosti i njihovih principa rada.

### 4.1. Solne kupke

Solne kupke su najjednostavniji, a time i najjeftiniji generatori vlažnosti. Solne otopine stvaraju relativnu vlažnost, tako da treba biti poznata temperatura komore i koncentracije solne otopine da se dobije željena relativna vlažnost. Nedostatak ove vrste generatora vlažnosti je da se umjeravanje higrometra može provoditi u jednoj točki relativne vlažnosti s jednom koncentracijom solne otopine. Uravnotežena relativna vlažnosti ovisi o temperaturi komore, promjenom temperature komore mijenja se i relativna vlažnosti. Za točno utvrđivanje relativne vlažnosti potrebne su kemijski čiste soli s destiliranom vodom. Otopine zasićenih soli imaju stabilnu koncentraciju i time stabilnu proizvedenu relativnu vlažnosti. U komori zajedno sa solnom kupkom se stavlja higrometar, temperatura u komori mora biti jednaka kako zrak u komori ne bi poprimio temperaturu različitu od zasićene otopine. Pri umjeravanju solnom kupkom greška zbog nestabilnosti temperature je  $\pm 1^\circ \text{C}$  pri  $97,6^\circ \text{C}$  može dostići i do 6%.

### 4.2. Generatori vlažnosti s dvije struje

Princip rada ovog generatora je zasnovan na miješanju dviju struja zraka, od kojih je jedna suhi zrak, a druga zasićeni vlažni zrak. Obje struje zraka su na istoj temperaturi i međusobnim miješanjem se dobiva traženo stanje relativne vlažnosti u komori za ispitivanje. Suhi zrak ulazi u sustav gdje se pomoću regulacijskih ventila (RV1) i (RV2) razdvaja na suhu i vlažnu struju. Suha struja ulazi u izmjenjivač topline (IT2), dok se druga struja dogrijava na temperaturu zasićenja u izmjenjivaču topline (IT1) i nakon toga se zasićuje u sturatoru (S). Rotametrima (protokomjerima) se regulira protok svake struje zasebno kako bi se dobio traženi omjer miješanja.



Slika 9. Generator vlažnosti s dvije struje

### 4.3. Generatori vlažnosti s dva tlaka

Zrak koji ulazi u generator vlage je suhi zrak komprimiran na najveći radni tlak. Kroz prigušni ventil (PV) suhi zrak se reducira na tlak zasićenja  $p_s$ , nakon toga se zrak zasićuje u saturatoru (S) pri temperaturi komore  $\vartheta_c$ . Cijeli se generator održava na temperaturi  $\vartheta_c$ . Nakon zasićenja ekspanzijskim ventilom (EV) se tlak zraka reducira na ispitni tlak  $p_c$  te se zrak dalje vodi u ispitnu komoru. Regulacijskim ventilom (RV) se regulira protok zraka kroz generator. Tlak u ispitnoj komori se mjeri manometrom (M). Relativna vlažnost proizvedena pomoću generatora vlažnosti s dva tlaka može se odrediti prema sljedećom jednadžbi:

$$\varphi = \frac{f(p_c, \vartheta_{sc}) \cdot (p_s(\vartheta_s))}{f(p_c, \vartheta_c) \cdot (p_s(\vartheta_{sc}))} \quad (18)$$

gdje su:

$\vartheta_{sc}$ - temperatura točke rose zraka u ispitnoj komori, [°C]

$p_s$ - tlak zasićenja zraka pri temperaturi  $t_{sc}$  odnosno  $t_c$ , [Pa]

$\vartheta_c$ - temperatura u ispitnoj komori, [°C]

$p_c$ - tlak u ispitnoj komori, [Pa]

$f$ - korekcijski faktor

Kako apsolutni tlak zasićenog zraka nije jednak apsolutnom tlaku u komori, gornju jednadžbu potrebno je prilagoditi pomoću jednadžbe:

$$p_s(\vartheta_{sc}) \cdot f(p_c, \vartheta_{sc}) = p_s(\vartheta_s) \cdot f(p_s, \vartheta_s) \cdot \frac{p_c}{p_s} \quad (19)$$

gdje je:

$\vartheta_s$ - temperatura zasićenja zraka, [°C]

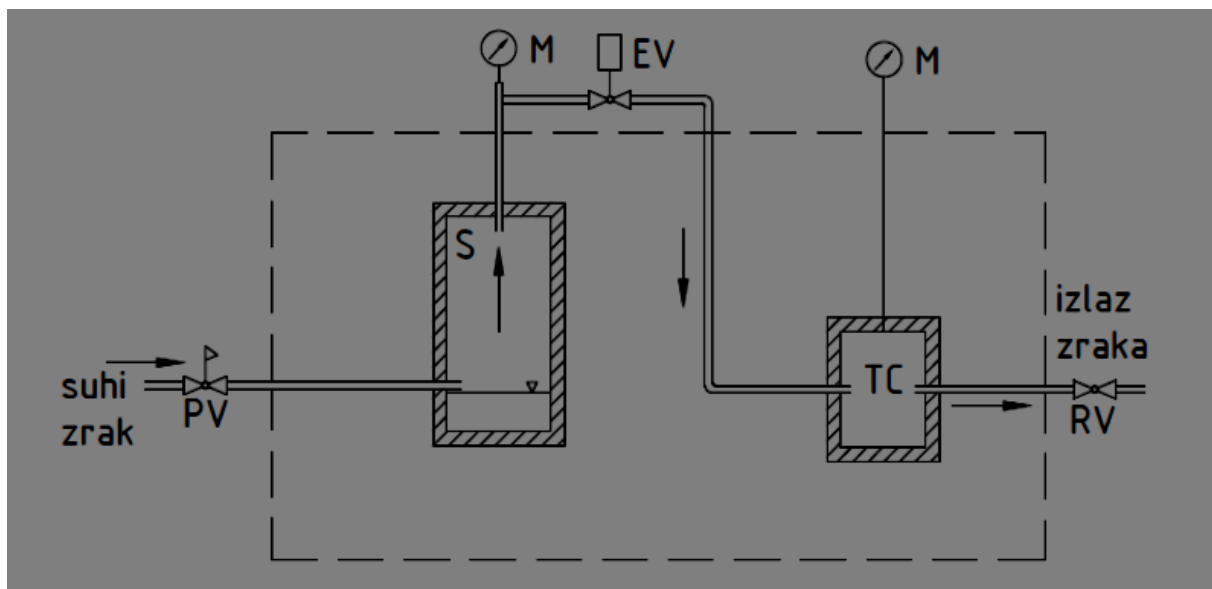
$p_s$ - tlak zasićenja zraka, [Pa]

Relativna vlažnost uz jednadžbu (19) može se prikazati kao:

$$\varphi = \frac{f(p_c, \vartheta_s) \cdot (p_s(\vartheta_s))}{f(p_c, \vartheta_c) \cdot (p_s(\vartheta_c))} \cdot \frac{p_c}{p_s} \quad (20)$$

kod generatora vlažnosti s dva tlaka  $\vartheta_s = \vartheta_c$  i uz zanemarivanje korekcijskog faktora  $f$  jednadžba (20) prelazi u oblik:

$$\varphi = \frac{p_c}{p_s} \quad (21)$$



Slika 10. Generator vlažnosti s dva tlak

#### 4.4. Dvotemperaturni generatori vlažnosti

Dvotemperaturni generator vlažnosti radi pri jednom tlaku, a zrak se zasićuje u saturatoru recirkulacijom ili jednim prolazom kroz generator. Uređaj se sastoji od jedne termostatisane kupke u kojoj se zrak zasićuje na temperaturu  $\vartheta_s$  i još jedne termostatisane kupke ili termostatisane komore u kojoj se zrak zagrijava na ispitnu temperaturu  $\vartheta_c$ . Temperatura točke rošenja kontrolira se mjerenjem temperature zraka u saturatoru. Pri konstrukciji generatora vlažnosti s dvije temperature cjevovodi su konstruirani tako da pad tlaka između saturatora i

ispitne komore bude što manji, stoga se može uvesti pretpostavka da je  $p_s \simeq p_c$ . Nakon potpunog zasićenja zraka, relativna vlažnost se može izračunati pomoću jednadžbe:

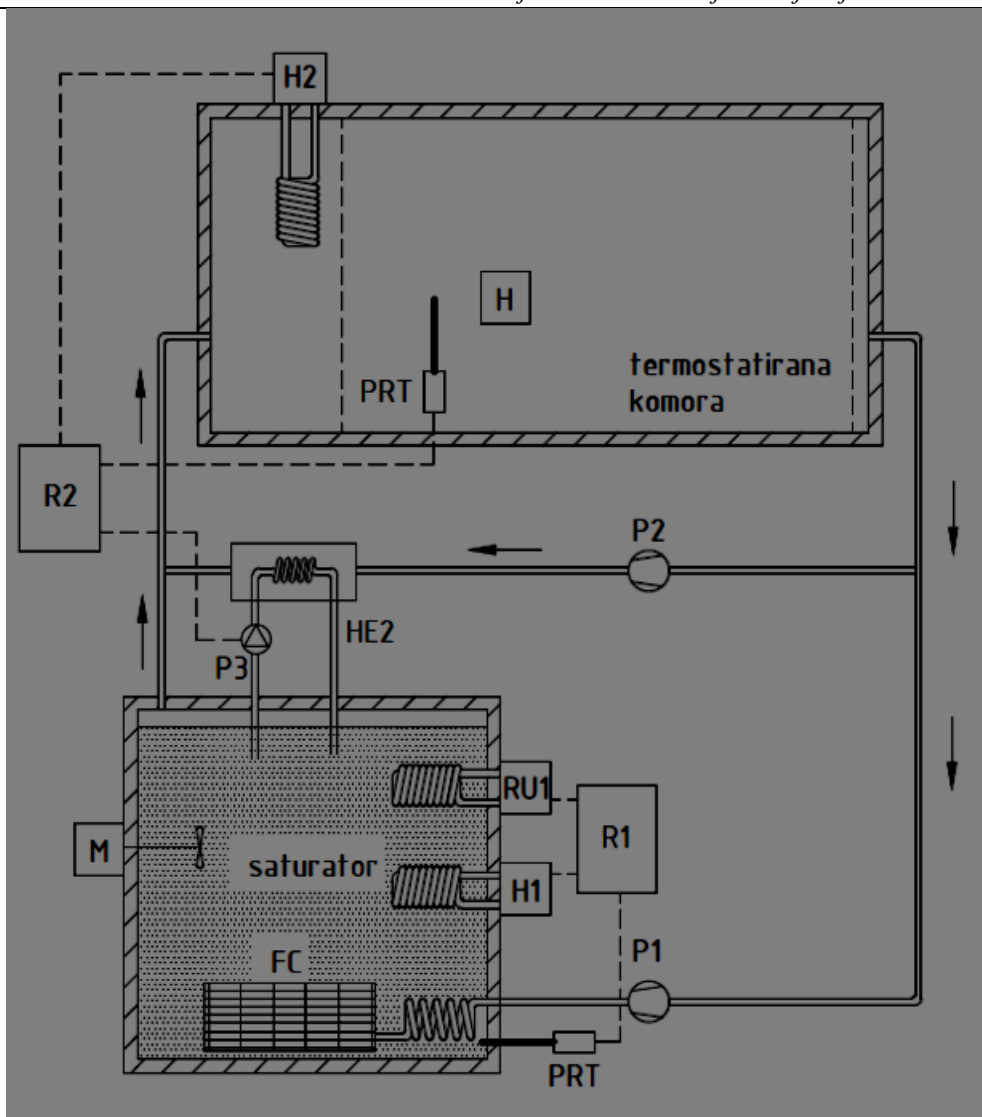
$$\varphi = \frac{f(p_c, \vartheta_s) \cdot (p_s(\vartheta_s))}{f(p_c, \vartheta_c) \cdot (p_s(\vartheta_s))} \quad (22)$$

Ako pretpostavimo da korekcijski faktor  $f$  ne ovisi značajno o temperaturi onda jednadžba (22) prelazi u oblik:

$$\varphi = \frac{p_s(\vartheta_s)}{p_s(\vartheta_c)} \quad (23)$$

#### 4.5. Generator vlažnosti s termostatiranom komorom

Klimatizirana komora je namjenjena za umjeravanje mjerila relativne vlažnosti, a sastoji se od 2-T generatora koji omogućuje postizanje točke rose od +4°C do +60°C i ispitne temperature u komori do +90°C. Zrak se zasićuje u saturatoru (S) koji je termostatirana izolirana kupka u kojoj se nalazi demineralizirana voda volumena 30 l, izmjenjivačka zavojnica (HE1), filter (FC), mješalica (M), platinasti otpornički termometar (PRT), rashladna jedinica (RU1) te električni grijač. Pomoću jednostupanjske centrifugalne zračne pumpe (P1) zrak dolazi u saturator, prolazi kroz (HE1) i (FC) nakon kojeg se raspršuje u mjehuriće, koji se prolaskom kroz vodu zasićuju na temperaturu  $\vartheta_s$ . Sa (RU1), (H1) i (PRT-om) se regulira temperatura zasićenja zraka. Nakon zasićenja zraka se vodi u termostatiranu komoru gdje se grije pomoću grijača promjenjivog kapaciteta (H2) na ispitnu temperaturu  $\vartheta_c$ . Termostatirana komora je izolirana poliuretanskom vunom debljine 200mm, a radni prostor komore je 600x600x600mm. Temperatura u komori se regulira pomoću (PRT-a), grijala promjenjivog kapaciteta (H2) i regulatora (R2). Mjerna linija ima i recirkulacijski krug koji se sastoji od aksijalnog ventilatora (P2), izmjenjivača topline (HE2) i grijača (H2). Ovim recirkulacijskim krugom se rasterećuje toplinsko i rashladno opterećenje glavne struje. Problem kondenzacije, odnosno, njezino sprječavanje osigurano je tako da voda koja pomoću pumpe (P3) prolazi kroz izmjenjivač (HE3) je ohlađena na temperaturu točke rose  $\vartheta_s$ . Voda u kupki se hladi na temperaturu  $\vartheta_s$  uz pomoć rashladne jedinice (RU1). Rad pumpe (P3) regulira se pomoću regulatora (R2). Na slici ispod prikazana je shema sa svim dijelovima generatora vlažnosti sa termostatiranom komorom.



Slika 11. Generator vlažnosti sa termostatiranom komorom



## 5. Metode umjeravanja

Umjeravanje je postupak u kojemu se pokušava postići izjednačenje vrijednosti mjerila koje se umjerava i mjernog sustava koji vrši umjeravanje. Mjerni sustav ima referentnu vrijednost koja je određena etalom. Umjeravanje se prvenstveno provodi kako bi se odredila točnost mjerila koja se koriste, također i uvidjela kolika je pogreška prilikom mjerenja. U ovom poglavlju biti će opisane metode putem kojim se mogu umjeravati mjerila relativne vlažnosti. Metode koje će biti opisane u sljedećim podpoglavljima koriste se za umjeravanje pretvornika vlage, higrometra sa senzorima, termo-higrometara i higrometara sa zapisivačima podataka u području relativne vlažnosti od 5-90%.

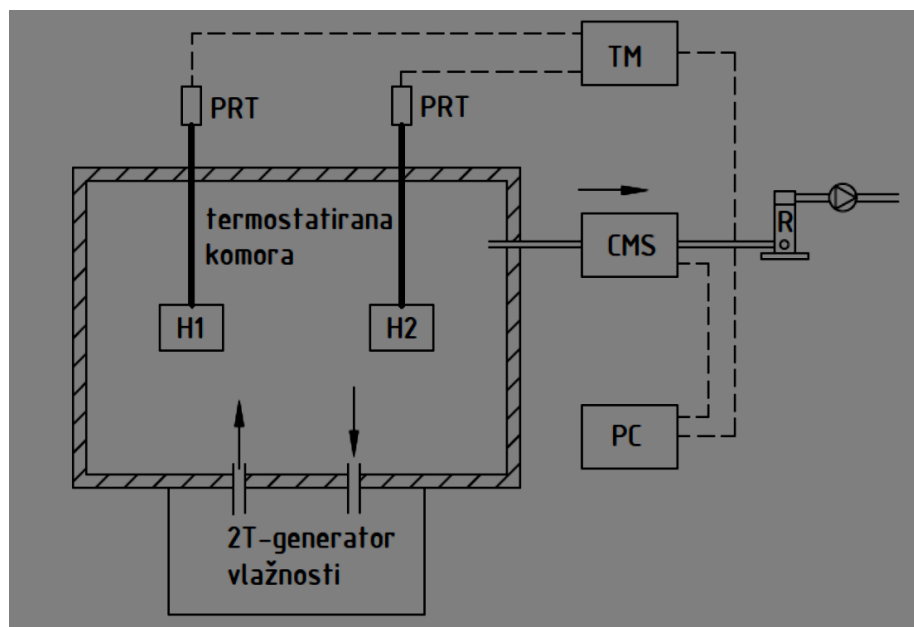
### 5.1. Metoda umjeravanja mjerenjem točke rosišta i ispitne temperature

Prilikom ovakvog načina umjeravanja mjerilo relativne vlažnosti koje se ispituje mora biti postavljeno u radni prostor izolirane komore. Komora mora biti izolirana kako bi se osigurali ispitni uvjeti, što uključuje ispitnu temperaturu i točno definiranu relativnu vlažnost.

Referentni standardi za određivanje referentne vrijednosti relativne vlažnosti su:

- Umjereni higrometar točke rose čiji senzor je hladeno ogledalo (CMS), postavljen je u radnom volumenu komore u blizini ispitnog uređaja. On mjeri temperaturu točke rose u blizini ispitnog uređaja
- Platinski otpornički termometar (PRT) je također postavljen u blizini ispitnog uređaja da mjeri ispitnu temperaturu, odnosno temperaturu na koju je ispitni uređaj izložen.

Vrijednost referentne relativne vlažnosti je izračunata pomoću izmjerene temperature točke rose i ispitne temperature. Glavne i ujedno jedine nesigurnost koje mogu uzrokovati grešku prilikom mjerenja su upravo ove dvije temperature. Shema jedne ovakve mjerne stanice prikazana je na slici ispod.



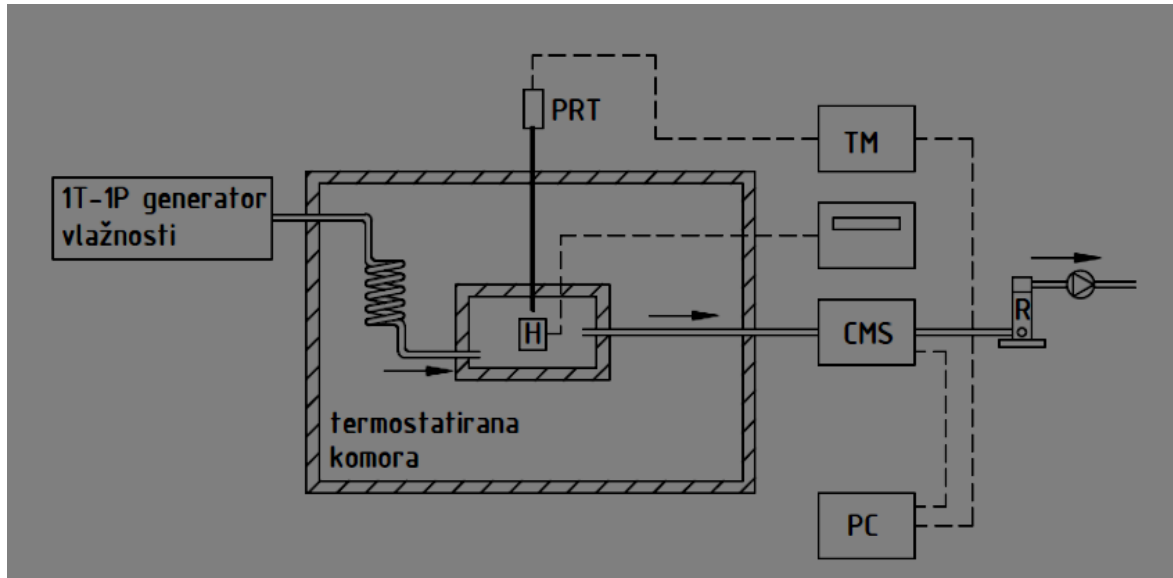
**Slika 12. Komora za umjeravanje s mjerenjem temperature točke rose i ispitne temperature**

U termostatisiranoj komori se nalaze ispitni uređaji (H1) i (H2) uz svakog su postavljeni platinski otpornički termometri (PRT) koji služe za mjerenje temperature. PRT mjere temperaturu na način da su povezani s računalom preko termometarskog mosta. Blizina postavljanje PRT-a i ispitnog uređaja je izrazito bitna zbog činjenice da se smanji utjecaj temperaturnog gradijenta u komori. Za mjerenje temperature točke rose postavljen je higrometar s hladnim ogledalom (CMS), a protok kroz njega se kontrolira rotametrom (R).

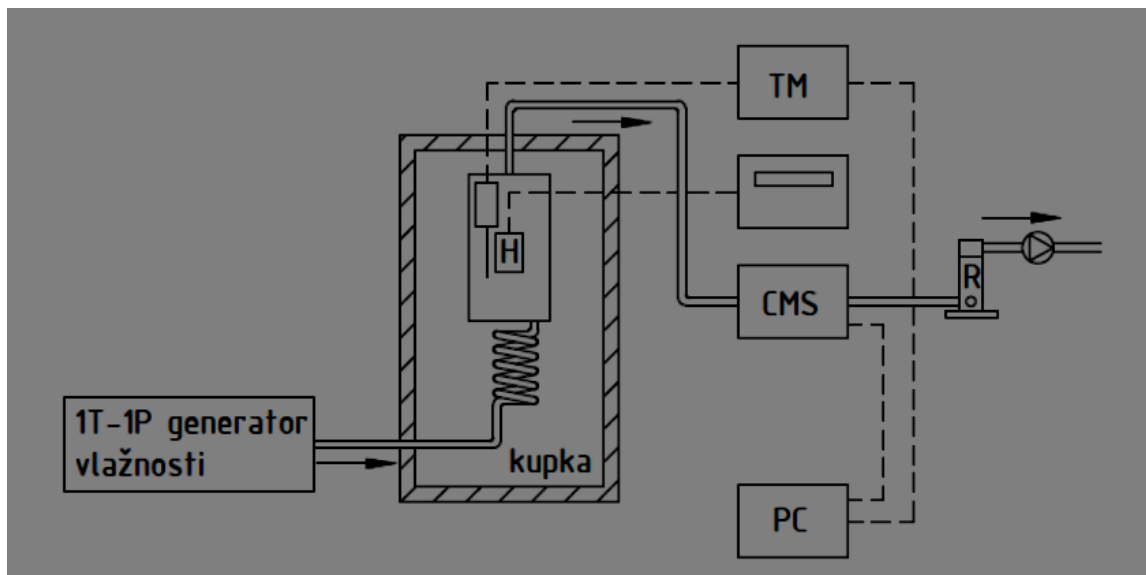
## **5.2. Metoda umjeravanja generiranjem relativne vlažnosti**

Ovlaženi zrak poznate temperature točke rose i poznatog tlaka je generiran u jednotemperaturnom generatoru s konstantnim tlakom. Nakon generatora zrak ide u malu komoru ili više njih koje mogu biti spojene serijski ili paralelno. Mala komora kontrolirane temperature može biti postavljena u veću komoru kontrolirane temperature ili može biti

potopljena u kupki. Postavljanje male komore u veću komoru ili kupku izvodi se kako bi se osigurala što ujednačenija temperatura oko ispitnog uređaja. Mjerna nesigurnost u ovoj metodi povezana je s mjerenjem temperature točke rose i tlaka te mjerenjem ispitne temperature i tlaka.



Slika 13. Umjeravanje generiranjem relativne vlažnosti u termostatisiranoj komori



Slika 14. Umjeravanje generiranjem relativne vlažnosti kupki

## 6. Mjerna nesigurnost

### 6.1. Osnovno o mjernoj nesigurnosti

Riječ „nesigurnost“ označava sumnju u rezultat i prema tome u najširem smislu „mjerna nesigurnost“ znači sumnju u valjanost mjernog rezultata. Prema definiciji *mjerna nesigurnost* je parametar koji se pridružuje rezultati mjerenja koji opisuje koja bi se razumno mogla pripisati mjerenoj veličini. Taj parametar može biti standardno odstupanje ili poluširina intervala s navedenom razinom povjerenja. Općenito, rezultat mjerenja je samo aproksimacija ili procjena vrijednosti mjerne veličine pa je prema tomu potpun samo kada je popraćen iskazom nesigurnosti te procjene. Nesigurnost mjernog rezultata odražava pomanjkanje točnog znanja vrijednosti mjerene veličine. Mjerni rezultat je i nakon ispravaka utvrđenih sustavnih djelovanja, zbog nesigurnosti koja potječe od slučajnih djelovanja i zbog nesavršenosti ispravaka rezultata i sustavnih djelovanja, još uvijek samo procjena vrijednosti mjerne veličine. Mjerni rezultat nakon ispravaka može biti neodredivo blizu „prave“ vrijednosti, ali isto tako može biti daleko stoga se ne smije nesigurnost mjernog rezultata proglasiti preostalom nepoznatom pogreškom. Mjernu nesigurnost kao kvantitativnu kategoriju valja razlikovati od točnosti mjerenja koja je kvalitativne prirode, iako se kolokvijalno smatra da je točnije mjerenje ono mjerenje kod kojeg se dobiva rezultat koji je bliže „pravom“. Točnije mjerenje je ono u kojem je na temelju izračuna dodijeljena manja mjerena nesigurnost. Pogreška mjerenja je mjerni rezultat umanjen za pravu vrijednost mjerne veličine. Nesigurnost mjernog rezultata sastoji se općenito od nekoliko metoda koji se prema načinu na koji se procjenjuje njihova brojčana vrijednost mogu razvrstati s dva razreda:

- razred A - koje se izračunavaju statističkim metodama
- razred B - koje se izračunavaju na drugi način

Ne postoji uvijek jednostavno podudaranje između razvrstavanja u razred A ili B.

Razlikujemo sustavne i slučajne sastavnice nesigurnosti. Naziv „sustavna nesigurnost“ može navoditi na pogrešno mišljenje i trebalo bi ga izbjegavati. Svaki iscrpan izvještaj o nesigurnosti trebao bi sadržavati potpun popis tih sastavnica, navodeći za svaku sastavnicu metodu upotrebljavanu za dobivanje njene brojčane vrijednosti. Sastavnice razreda A opisuju se procijenjenim varijancijama  $s_i^2$  (ili procijenjenim standardima odstupanja  $s_i$ ) i brojem stupnjeva slobode  $\nu_i$ . Gdje je to prikladno trebalo bi dati i kovarijancije. Sastavnice razreda B trebale bi se opisivati veličinama  $u_j^2$  koje se mogu smatrati približnim vrijednostima odgovarajućih varijancija. Sastavljena nesigurnost i njezine sastavnice trebale bi se izražavati

u obliku standardnih odstupanja. Ako je za posebne primjene potrebno sastavljenu nesigurnost množiti kojim faktorom da bi se dobila ukupna nesigurnost, upotrebljeni množinski faktor uvijek treba navesti. Prilikom mjerenja u praksi nailazimo na mnoge izvore nesigurnosti, neki od njih su:

- Nepotpuna definicija mjerene veličine
- Nereprezentativno uzrokovanje
- Nesavršeno ostvarenje definicije mjerne veličine
- Nedostatno poznavanje djelovanja uvjeta okoliša na mjerenje ili nesavršeno mjerenje uvjeta okoliša
- Osobnu pristranost u očitavanju analognih instrumenata
- Konačno razlučivanje instrumenata ili prag pokretljivosti
- Netočne vrijednosti mjernih etalona
- Aproksimacije i pretpostavke uključene u mjernu metodu i postupak
- Promjene opetovanih opažanja mjerne veličine u očigledno istim uvjetima

## 6.2. Temeljno statistički nazivi i pojmovi

Kako bi se mogli snalaziti u tekstu koji slijedi potrebno je definirati i objasniti određene pojmove.

*Vjerojatnost* – realan broj u rasponu od 0 do 1 pridružen slučajnom događaju.

*Slučajna varijabla* – varijabla koja može poprimiti bilo koju vrijednost iz određenog skupa vrijednosti, a kojoj je pridružena kakva razdioba vjerojatnosti. Slučajna varijabla koja može poprimiti samo zasebne vrijednosti naziva se „diskretnom“, a slučajna varijabla koja može poprimiti bilo koju vrijednost unutar konačnog ili beskonačnog intervala naziva se „neprekidnom“.

*Funkcija razdiobe* – funkcija koja za svaku vrijednost  $x$  daje vjerojatno da će slučajna varijabla  $X$  biti manja ili jednaka  $x$ :

$$F(x) = P_r(X \leq x) \quad (24)$$

*Razdioba vjerojatnosti* – funkcija koja daje vjerojatnost da će slučajna varijabla poprimiti bilo koju danu vrijednost ili da pripada određenom skupu vrijednosti.

*Funkcija gustoće vjerojatnosti* – derivacija funkcije razdiobe, naravno ako je derivacija funkcije moguća.

$$f(x) = dF(x)/dx \quad (25)$$

*Korelacija* – odnosno između dviju ili više varijabli u razdiobi dviju ili više slučajnih varijabli.

- Za diskretnu slučajnu varijablu  $X$  koja poprima vrijednosti  $x_i$ s vjerojatnostima  $p_i$  očekivanje je, ako ono postoji, jednako:

$$\mu = E(x) = \sum p_i \cdot x_i \quad (26)$$

- Za neprekidnu varijablu  $X$  koja ima funkciju gustoće vjerojatnosti  $f(x)$ , očekivanje je, ako ono postoji, jednako:

$$\mu = E(x) = \int xf(x)dx \quad (27)$$

*Varijancija* – mjera rasipanja koja je jednaka zbroju kvadrata odstupanja opažanja od njihove prosječne vrijednosti podijeljenom s brojem opažanja umanjenim za jedan. Za  $n$  opažanja  $x_1, x_2, \dots, x_n$ s prosječnom vrijednosti

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum x_i \quad (28)$$

varijancija je

$$s^2 = \frac{1}{(n-1)} \cdot \sum (x_i - \bar{x})^2 \quad (29)$$

*Standardno odstupanje* – pozitivan drugi korijen varijacije

*Kovarijancija* – mjera ovisnosti dviju slučajnih varijabli. Kovarijancija dviju slučajnih varijabli  $y$  i  $z$  određuje se izrazom:

$$(30)$$

što vodi:

$$cov(y, z) = cov(z, y) = \int (y - \mu_y)(z - \mu_z)p(y, z)dydz \quad (31)$$

gdje je  $p(y, z)$  skupina funkcija gustoće vjerojatnosti dviju varijabli  $y$  i  $z$ .

### 6.3. Određivanje standardne mjerene nesigurnosti

U većini slučajeva mjerena veličina  $Y$  ne mjeri se izravno, nego se određuje iz  $N$  drugih veličina  $X_1, X_2, \dots, X_N$  na temelju funkcijskog odnosa  $f$ :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (32)$$

Ulazne veličine  $X_1, X_2, \dots, X_N$  o kojima ovisi izlazna veličina  $Y$  mogu se same promatrati kao mjerene veličine i mogu same ovisiti o drugim veličinama, uključujući ispravke i faktore ispravka zbog sustavnih djelovanja čime matematički model mjerenja postaje složeniji te nekada i nije moguć zapis u eksplicitnom obliku. Sa  $y$  se označava procjena mjerene nesigurnosti veličine  $Y$  na temelju procjena ulaznih veličina  $X_i$ :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (33)$$

Procijenjeno standardno odstupanje pridruženo procjeni izlazne veličine  $y$  naziva se složena standardna nesigurnost,  $u_c(y)$  određena na temelju standardnih odstupanja svake ulazne veličine  $x_i$ , koje se nazivaju standardne nesigurnosti  $u(x_i)$ .

#### 6.3.1. Računanje standardne nesigurnosti metodom A

Nesigurnost tipa A određuje se eksperimentalno, ponavljanjem mjerenja i računanjem standardnog odstupanja rezultat ponovljenih mjerenja. Za obradu rezultata mjerenja koriste se statističke metode. Niz od  $n$  ponovljenih mjerenja smatramo slučajnim uzorkom osnovnog skupa od beskonačno mnogo mogućih rezultata mjerenja iste (vremenski nepromjenjive) mjerne veličine  $q_j$ . Aritmetička sredina uzorka,  $\bar{q}$  i eksperimentalno standardno odstupanje  $s(q)$  slučajne su varijable i razlikuju se od uzorka do uzorka. Aritmetičke sredine uzorka imaju najveću frekvenciju oko aritmetičke sredine osnovnog skupa  $\mu_q$  prema određenim razdiobama, npr. *Gaussovoj*. Na temelju tih razdioba može se izračunati koliko je vjerojatnost da se slučajna varijabla nalazi u nekom rasponu vrijednosti. Zadatak mjeritelja je da se na temelju ograničenog broja mjerenja računajući srednju vrijednost uzorka  $\bar{q}$  i  $s(q)$  procjeni aritmetičku sredinu osnovnog skupa  $\mu_q$  tj. vrijednost mjerene veličine i konačno standardno odstupanje  $\sigma$ . Aritmetička sredina uzorka računa se na sljedeći način:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n q_k \quad (34)$$

najbolje aproksimira pravu vrijednost mjerene veličine, ali općenito nije jednaka pravoj vrijednosti mjerene veličine i ne znamo da li se i koliko od nje razlikuje dok ne uzrokuje

cijeli osnovni skup, što se u praksi izrazito rijetko radi. Pojedinačna mjerenja razlikuju se po vrijednostima zbog slučajnih promjena utjecajnijih veličina ili slučajnih djelovanja.

Eksperimentalna varijancija tih mjerenja koja daje procjenu varijacije razdiobe vjerojatnosti veličine  $q$ , dana je izrazom:

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2 \quad (35)$$

Ta procjena varijancije i njezin pozitivan drugi korijen  $s(q_k)$ , koji se naziva eksperimentalnim standardnim odstupanjem opisuje promjenjivost mjernih vrijednosti  $q_j$ , ili točnije njihovo rasipanje oko njihove srednje vrijednosti  $q$ . Najbolja procjena standardne nesigurnosti vrste A računa se kao pozitivni korijen varijance:

$$u^2(x_i) = \frac{s^2(q_k)}{n} = s^2(\bar{q}) \quad (36)$$

### 6.3.2. Računanje standardne nesigurnosti metodom B

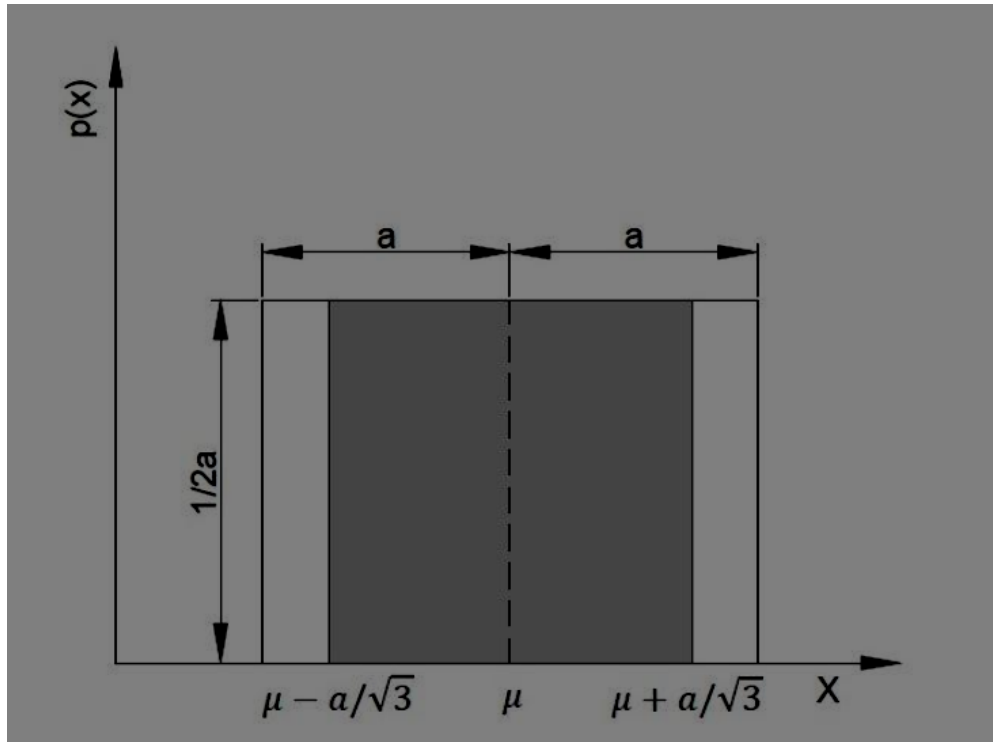
Nesigurnost tipa B izračunava se znanstvenom prosudbom koja se temelji na svim raspoloživim podacima. Tako da se nesigurnost može temeljiti na par parametara:

- Specifikacija mjerene opreme
- Podaci o umjeravanju mjerila
- Nesigurnost korištenih podataka koju su preuzeti iz priručnika ili drugih izvora
- Prijašnji mjerni podaci
- Iskustvo i znanje o svojstvima relativnih mjerila
- Razni drugi parametri, kao što su: zaokruživanje, razlučivost i histereza

Procjena sastavnica mjerne nesigurnosti B-vrste temelji se na apriornim razdiobama. Mjerna nesigurnost mora se odrediti na temelju iskustva ako ona nije nigdje navedena. Ako se za veličinu  $X_i$  može pretpostaviti razdioba vjerojatnosti, tada kao procjenu  $x_i$  ulazne veličine i pridruženu standardnu nesigurnost  $u(x_i)$  treba uzeti redom odgovarajuće očekivanje ili očekivanu vrijednost i drugi korijen varijancije te razdiobe. Ukoliko su o nekom instrumentu poznate samo maksimalne greške navedene u specifikaciji i ukoliko nema nikakvih podataka o distribuciji mjerene vrijednosti unutar sigurnih granica, pretpostavlja se jednaka vjerojatnost pojavljivanja izmjerene veličine unutar intervala  $\pm a$ . Takva razdioba naziva se pravokutnom i



predstavlja najnepovoljniju razdiobu mjernog rezultata unutar sigurnih granica. Donja slika prikazuje pravokutnu razdiobu.



Slika 15. Pravokutna razdioba

Očekivana vrijednost  $x_i$  mjerene veličine nalazi se u središtu intervala  $x_i = (-a + (+a))/2$  s pridruženom varijancijom :

$$u^2(x_i) = \frac{a^3}{3} \quad (37)$$

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

$$u_b = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (38)$$

Osim pravokutne, može se pretpostaviti trokutna ili trapezna razdioba. Ukoliko se usvoji pretpostavka da su izmjerene vrijednosti u sredini intervala razdioba se može pretpostaviti kao trokutna  $u_b = \frac{a}{\sqrt{6}}$  ili ako postoje podaci da je vjerojatnost pojavljivanja izmjerene vrijednosti

veća u području  $a \cdot \beta$ , nego na rubovima intervala pogodno je upotrijebiti trapeznu razdiobu

$$u_b = \frac{a}{\sqrt{6}} \cdot \sqrt{1 + \beta^2}.$$

### 6.3.3. Računanje standardne nesigurnosti izlazne veličine

Mjerna veličina  $Y$  ovisi o više ulaznih veličina  $X_1, X_2, \dots, X_N$  prema funkciji  $f$ .

Ulazne veličine mogu biti:

- međusobno neovisne
- korelirane

Ako su veličine međusobno neovisne onda promjena jedne ne uzrokuje promjenu ni jedne od preostalih veličina. Standardna nesigurnost  $u_i(y)$  pridružena procjeni izlazne veličine dobiva se iz standardne nesigurnosti pridružene procjene  $x_i$  ulazne veličine, a njen kvadrat se računa prema izrazu:

$$u_i^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \cdot u^2(x_i) \quad (39)$$

gdje je  $u(x_i)$  standardna nesigurnost ulaznih veličina  $x_1, x_2, \dots, x_n$  procijenjene metodom tipa A ili tipa B. Jednadžba (37) se temelji na prvom približavanju *Taylorovog* reda. Kada je funkcija  $f$  značajno nelinearna potrebno je računati i s višim članovima *Taylorovog* reda.

Parcijalne derivacije  $\frac{\partial f}{\partial x_i}$  nazivaju se koeficijenti osjetljivosti  $c_i$  i određuju se za vrijednosti  $X_i = x_i$ . Koeficijenti osjetljivosti pokazuju za koliko se promijeni procijenjena veličina  $y$  kada se pojedina od procijenjenih veličina  $x_1, x_2, \dots, x_n$  promijeni za mali iznos  $\Delta x_i$ . U slučaju da se derivacije funkcije  $y$  ne mogu analitički izraziti, koeficijenti se računaju numeričkim metodama.

### 6.3.4. Određivanje proširene mjerene nesigurnosti

Proširena mjerna nesigurnost je veličina koja određuje interval oko mjernog rezultata za koji se može očekivati da obuhvaća veliki dio razdiobe vrijednosti koje bi se razumno mogle pripisati mjernoj veličini. Povećana nesigurnost dobiva se množenjem sastavljene standardne nesigurnosti faktorom proširenja  $k$ , a označava se s  $U$ :

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (40)$$

Vrijednost faktora pokrivanja  $k$  može se odrediti samo ako je poznata razdioba vjerojatnosti svake ulazne veličine i ako se te razdiobe sastavljene da bi se dobila razdioba izlazne veličine. Uobičajeno je pri iskazivanju proširene mjerne nesigurnosti podacima priložiti stupanj pouzdanosti  $p$  koji pokazuje s kojom se vjerojatnošću nalazi izmjerena veličina u navedenom intervalu. Faktor proširenja  $k$  za normalnu i pravokutnu razdiobu prikazana je sljedećoj tablici uz pripadni stupanj pouzdanosti  $p$ .

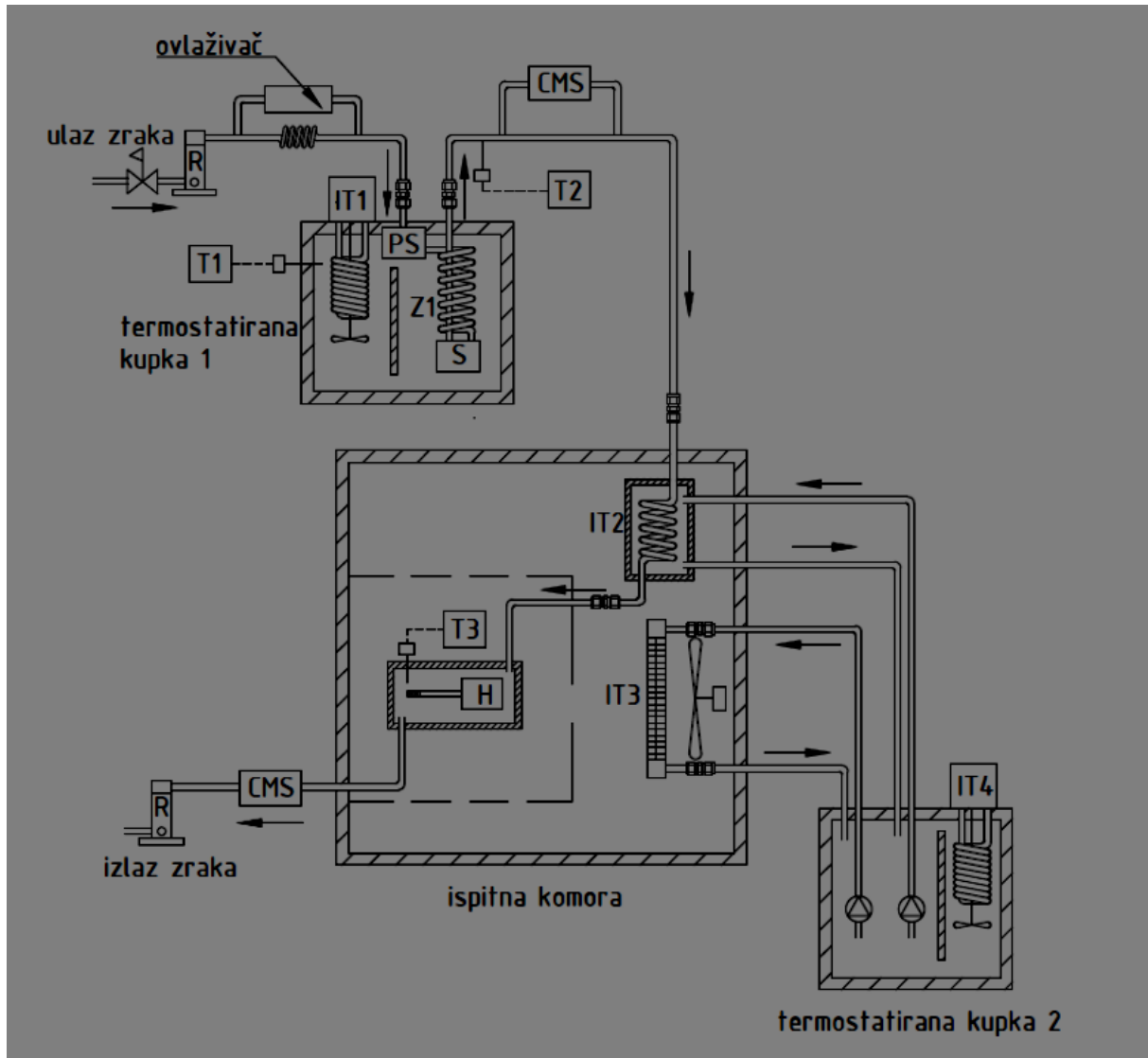
**Tablica 1. Faktor proširenja za normalnu i pravokutnu razdiobu**

Stupanj proširenja $p$ %	Faktor proširenja $k$	
	Normalna razdioba	Pravokutna razdioba
68.7	1	1.19
90	1.645	1.55
95	1.96	1.645
95.45	2	1.723
99	2.576	1.715
99.73	3	1.727

## 7. Opis cjelovitog sustava za umjeravanje higrometara relativne vlažnosti zraka

Okolišni zrak se prolaskom kroz adsorpcijski sušač suši na temperaturu injišta od otprilike -40°C. Zrak se zatim pomoću preciznog regulatora prigušuje na tlak malo iznad tlaka okoline te dolazi do rotametra (R) kojim mu se kontrolira protok. Nakon rotametra zrak se dijeli na dvije struje, jedna se struja ovlažuje u ovlaživaču dok druga struja ostaje suha. Kako bi se ostvarili podjednaki protoci suhog zraka i zraka koji se ovlažuje, napravljena je zavojnica koja stvara pad tlaka jednak onom u ovlaživaču. Miješanjem dviju struja zraka u jednakom omjeru dobije se mješavina koja se dalje vodi prema predsaturatoru (PS). Predsaturator je zajedno s izmjenjivačem topline (IT1), i saturatorom smješten u radnom volumenu termostatirane kupke 1. U predsaturatoru (PS) se zrak zasićuje na temperaturu koja je približno jednaka željenoj temperaturi točke rose  $\vartheta_s$ . U predsaturatoru se može nalaziti voda ili led, ovisno o željenoj temperaturi injišta odnosno rosišta. Nakon predsaturatora zrak ulazi u izmjenjivačku zavojnicu (Z1) gdje se hladi na temperaturu  $\vartheta_s$ . Kada se zrak ohladi na temperaturu  $\vartheta_s$ , ulazi u saturator (S) gdje se osigurava potpuno zasićenje zraka. Temperatura injišta/rosišta mjeri se etalonskim termometrima (T1) i (T2). Termometar (T1) mjeri temperaturu kupke, dok termometar (T2) mjeri temperaturu zraka na izlazu iz saturatora (S). Nakon prolaska kroz saturator, jedan dio zraka se vodi prema komori za umjeravanje higrometara dok drugi dio prolazi kroz umjereni higrometar točke rose s hlađenim ogledalom (CMS). Higrometar točke rose služi kao dodatna komponenta sigurnosti kojom se provjerava se da li je zrak na izlasku iz generatora zasićen na željenu temperaturu injišta/rosišta. Zrak odveden u ispitnu komoru zagrijava se pomoću izmjenjivača topline (IT2) na željenu ispitnu temperaturu te se vodi na ulaz male ispitne komore u kojoj su smješteni referentni i ispitivani uređaji (H). Iz male ispitne komore zrak se vodi kroz (CMS), rotametar (R) te izlazi u okoliš. Higrometrom točke rose (CMS) provjerava se odstupanje temperature injišta/rosišta na izlazu iz komore u odnosu na injište/rosište na njenom ulazu. Na ovaj način moguće je utvrditi da li je prolaskom kroz izmjenjivač i komoru došlo do promjene injišta/rosišta zraka u odnosu na stanje na izlazu iz generatora. Temperatura u maloj ispitnoj komori se mjeri pomoću termometra (T3). Temperatura izmjenjivača topline i male komore regulira se pomoću izmjenjivača topline (IT3), smještenog u većoj klimatiziranoj komori. Korištenjem male komore postiže se smanjenje temperaturnih gradijenata u volumenu u koji su smješteni higrometri, u odnosu na gradijente u volumenu velike komore. Manjim radnim volumenom također se smanjuju potreban protok zraka poznatog injišta/rosišta, vrijeme potrebno za ispiranje komore te

vrijeme umjeravanja. Izmjenjivači topline (IT2) i (IT3) napajaju se vodom ili alkoholom, pomoću pumpi smještenih u termostatoranoj kupki 2 kojom se regulira željena temperatura zraka u komori.

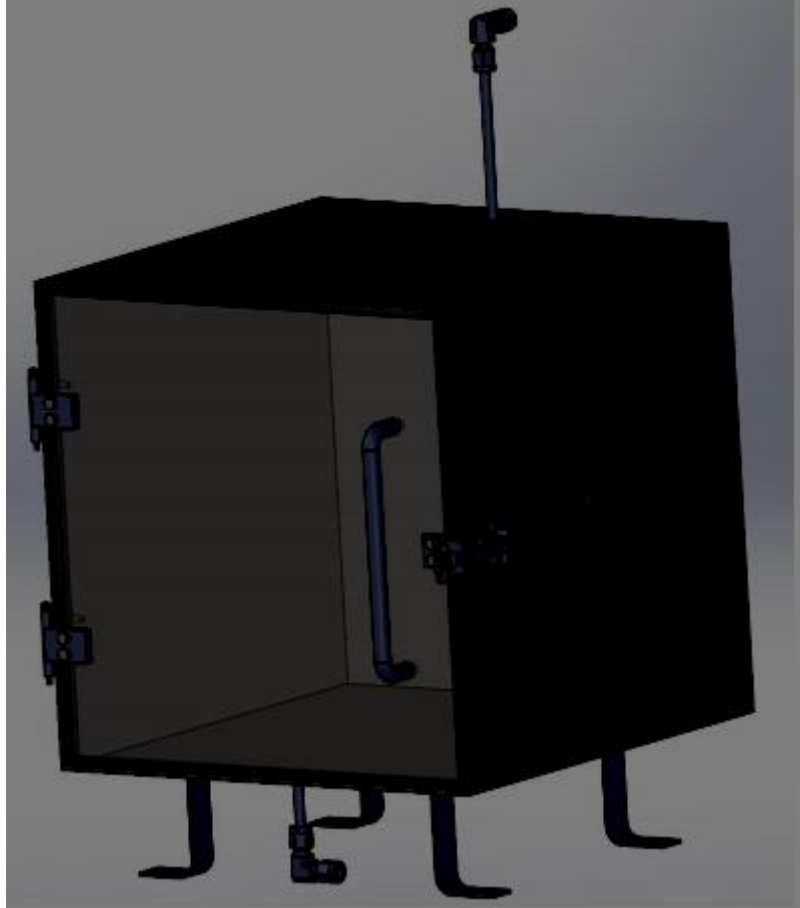


Slika 16. Funkcionalna shema spajanja u sustav umjeravanja

### 7.1. Mala ispitna komora

Stjenke male komore izrađene su od lima dok su je za izradu vratašca predviđeno korištenje pleksiglasa. S unutarnje strane vrata, u području između lima i vratašca, postavljena je

izolacija kako bi se spriječilo prodiranje vanjskog zraka u komoru. Ovdje je bitno napomenuti je zrak koji se nalazi u vanjskoj ( velikoj komori) irelevantan za mjerenje stoga je bitno osigurati da taj zrak ne utječe na parametre unutar manje komore, jer bi to moglo povećati nesigurnost umjeravanja. Mala ispitna komora prikazana je na slici 17.



Slika 17. Mala ispitna komora

### 7.3. Izmjenjivač

U ovom poglavlju prikazan je termodinamički proračun izmjenjivača s cijevnom zavojnicom. Osnovni kriterij za termodinamičko proračunavanje zavojnice je omogućavanje grijanja zraka od minimalne temperature točke rose  $\vartheta_s$  do maksimalne ispitne temperature  $\vartheta_c$ . Najveća predviđena temperatura u ispitnoj komori je  $\vartheta_c=30^{\circ}\text{C}$ , a najniža temperatura točke rose je  $\vartheta_s=14^{\circ}$ . Protok zraka kroz izmjenjivač je  $q_v=3 \text{ l/min}$ . Izmjenjena toplina u zavojnici između zraka i radnog medija u posudi je:

$$Q = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta_m \quad (41)$$

gdje je:

$k$  – koeficijent prolaza topline, [ $W/m^2 K$ ]

$A$  – površina izmjena topline, [ $m^2$ ]

$\Delta\vartheta_m$  – srednja logaritamska temperaturna razlika, [ $^{\circ}C$ ]

$\vartheta_w$  – temperatura vode, [ $^{\circ}C$ ]

$\vartheta_s$  – ulazna temperatura zasićenog zraka, [ $^{\circ}C$ ]

$\vartheta_{iz}$  – izlazna temperatura zraka iz zavojnice, [ $^{\circ}C$ ]

Određivanje koeficijenta prolaza topline  $k$  s obzirom na vanjsku stijenku cijevi:

$$k = \frac{1}{\frac{R_v}{R_u \alpha_u} + \frac{1}{\alpha_v}} \quad (42)$$

gdje su:

$\alpha_u$  – koeficijent prijelaza topline na unutarnjoj strani stijenke cijevi, [ $W/m^2 K$ ]

$\alpha_v$  – koeficijent prijelaza topline na vanjskoj strani stijenke cijevi, [ $W/m^2 K$ ]

$R_u$  – unutarnji polumjer cijevi, [m]

$R_v$  – vanjski polumjer cijevi, [m]

Određivanje koeficijenta prijelaza topline  $\alpha_v$

Koeficijent  $\alpha_v$  se proračunava prema jednadžbi za slobodnu konvekciju oko horizontalne cijevi. Za određivanje *Nussltove* značajke korišten je izraz prema *Mc Adamsu* iz:

*B. Slipčević "Razmjenjivači topline".*

$$Nu = 0,53 \cdot (Gr \cdot Pr)^{(1/4)} \quad (43)$$

*Grashofova* značajka:

$$Gr = \frac{9,81 \cdot \beta \cdot l_0^3 \cdot (\vartheta_{st} - \vartheta_w)}{v^2} \quad (44)$$

gdje su:

$\nu$  – kinematička viskoznost, [ $m^2/s$ ]

$\vartheta_{st}$ - temperatura vanjske stijenke cijevi, [ $^{\circ}C$ ]

$\vartheta_w$ - temperatura vode oko cijevi, [ $^{\circ}C$ ]

$l_0$ - karakteristična duljina, [m]

$\beta$ - koeficijent toplinskog širenja, [ $1/K$ ]

*Prandtl*ova značajka:

$$Pr = \frac{\nu \cdot \rho}{\lambda} \quad (45)$$

gdje je:

$\lambda$ - toplinska provodnost medija, [ $W/mK$ ]

Iz *Nusselt*ove značajke slijedi

$$Nu = \frac{\alpha_v \cdot l_0}{\lambda} \quad (46)$$

Određivanje koeficijenta prijelaza topline zraka na unutarnjoj stijenci zavojnice za slučaj laminarnog strujanja:

$$Nu = 3,65 + 0,08(1 + 0,8 \cdot (\frac{d_u}{D})) \cdot Pr^{(1/3)} \cdot Re^{(0,5+0,29 \cdot (\frac{d_u}{D})^{0,194})} \quad (47)$$

gdje su:

$Re$  – *Reynoldsova* značajka

$\nu$  – brzina zraka u zavojnici, [m/s]

$d_u$ - unutarnji promjer cjevovoda, [m]

$D$  – srednji promjer zavojnice, [m]



Iz Nusseltove značajke slijedi:

$$Nu = \frac{\alpha_u \cdot d_u}{\lambda} \quad (48)$$

Izmjena topline zraka u zavojnici je:

$$Q = q_v \cdot \rho_z \cdot c_p \cdot (\vartheta_{iz} - \vartheta_s) \quad (49)$$

gdje su:

$q_v$ - protok zraka, [ $m^3/s$ ]

$\rho_z$ - gustoća zraka, [ $kg/m^3$ ]

$c_p$ - specifični toplinska kapacitet zraka, [ $J/kg K$ ]

Izmjena topline između vode i vanjske stijenke cijevi:

$$Q = \alpha_u \cdot \pi \cdot d_v \cdot l \cdot (\vartheta_w - \vartheta_{st}) \quad (50)$$

gdje su:

$\vartheta_w$ - temperatura vode, [ $^{\circ}C$ ]

$\vartheta_{st}$ - temperatura na vanjskoj površini stijenke cijevi, [ $^{\circ}C$ ]

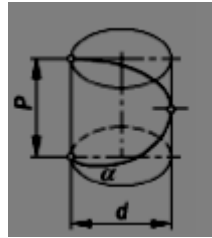
**Tablica 2. Rezultati proračuna zavojnice**

$q_v$	$d_u$	Re	$\alpha_u$	$\alpha_v$	$t_s$	$t_{iz}$	$t_w$	Q	l
3	0,004	1038	23,32	38,92	1408	30	32	1,06	0,72

#### 7.4. Konstrukcija izmjenjivača topline

Gornjim je proračunom dobiveno da duljina zavojnice treba iznositi  $l=0,72$  m.

$$tg\alpha = \frac{P}{d \cdot \pi} \quad (51)$$



Slika 18. Zavojnica

gdje su:

P – korak zavojnice, [m]

d – promjer zavojnice, [m]

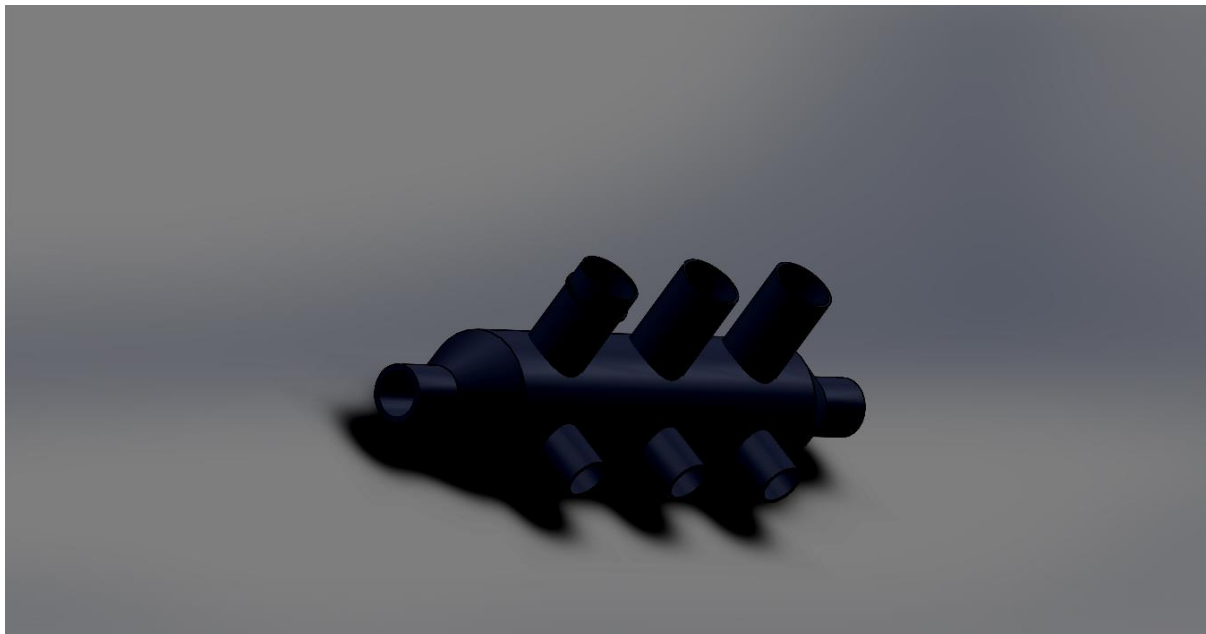
Zbog konstrukcijskih razloga zavojnicu je potrebno produžiti na  $l = 1,25$  m s korakom od  $P=20$  mm i promjerom  $d=100$ mm. Zavojnica je napravljena od cijevi vanjskog promjera  $d_v=6$  mm.

#### 7.5 Prototipna ispitna komora

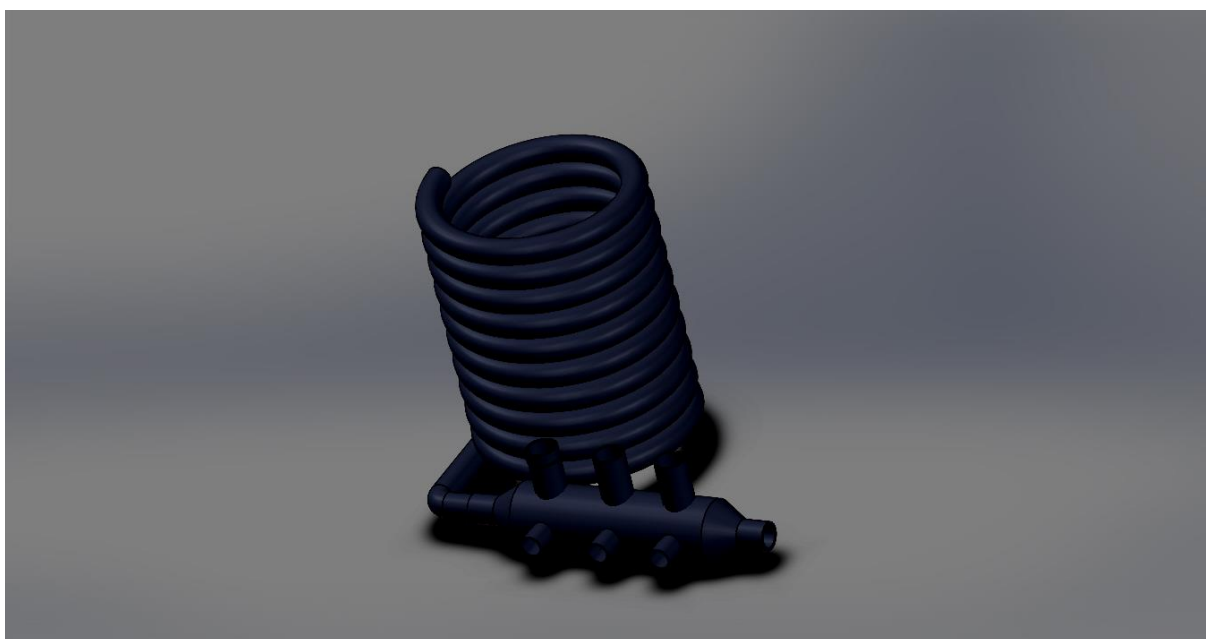
U sklopu ovog završnog rada osim male komore bilo je potrebno dizajnirati i prototipnu komoru koja bi se mogla koristiti i u radnom volumenu termometrijskih kupki.

Prototipna komora konstruirana je u obliku cilindra u koji prodire 8 cijevi, kako je prikazano na slici 19. Dvije cijevi čije se osi poklapaju s osima cilindra predviđene su za dovod i odvod vlažnog zraka iz komore. Za postavljanje ispitivanih instrumenata u radni volumen cilindra predviđene su tri ulazne cijevi koje u cilindar prodiru kroz stjenku. Prikazanim rješenjem

također su predviđene tri ulazne cijevi za postavljanje termometara. Ovdje je potrebno spomenuti da se radi o konstrukcijskom prototipu te nisu napravljene simulacije strujanja zraka kroz komoru. Ukoliko je broj umjeravanih instrumenata manji od broja ulaznih cijevi u komoru, neiskorištene ulazne cijevi potrebno je zabrtviti gumenim čepom. Postavljanje higrometara u radni volumen komore izvodi se pomoću gumenih brtvi umetnutih u ulazne cijevi komore. Brtve primarno služe za sprječavanje istjecanja zraka iz komore u vanjski prostor (odnosno ulaska zraka iz okoline u komoru, u slučaju da je tlak u komori niži od tlaka okoline) no također pridržavaju instrumente na željenoj poziciji unutar komore. Kako bi se osigurala što bolja izolacija radnog volumena komore, predlaže se korištenje minimalno dvije gumene brtve.. Za umjeravanja najveće razine točnosti potrebno je mjeriti temperaturu zraka u neposrednoj blizini higrometara, budući da kroz tijelo higrometra može doći do provođenja topline iz okoline ili do njegovog samozagrijavanja. Samozagrijavanje je posljedica zagrijavanja elektroničkih komponenti smještenih u tijelo higrometra. Iz ovog razloga na komori su predviđene ulazne cijevi za umetanje termometara u njen radni volumen, u neposrednoj blizini osjetnika higrometara te pripadne gumene brtve.



Slika 19. Prototipna komora u izometriji



Slika 20. Prototipna komora i izmjenjivač

### **7.6. Prednosti i nedostaci prototipne komore**

Prednosti prototipne komore u usporedbi s klasičnom su:

- manje dimenzije
- manji radni volumen (manji temperaturni gradijenti)
- kompaktniji dizajn
- brže umjeravanje
- bolja zaštita od istjecanja zraka iz radnog volumena komore

Nedostaci prototipne komore u usporedbi s klasičnom komorom su:

- preglednost – nije vidljivo gdje se točno uređaji za umjeravanje nalaze unutar same komore
- cijena konstrukcije i kompleksnost
- moguće zagušenje protoka
- ukoliko se ne koriste neki otvori za mjerenje uređaje potrebno ih je zabrtviti

## **8. ZAKLJUČAK**

Cilj ovog završnog rada je dati pregled postupaka koji se koriste za umjeravanja mjerila relativne vlažnosti zraka, te konstruirati komoru za umjeravanje higrometara, koju je moguće primijeniti u kombinaciji s postojećom mjernom opremom Laboratorija za procesna mjerenja.

U okviru rada konstruirana je prototipna komora manjih dimenzija, koju je moguće primijeniti unutar radnog volumena veće klimatizirane komore te unutar termostatirane kupke. Uz konstrukciju komore izvršen je termodinamički proračun te konstrukcija pripadnog izmjenjivača topline, koji služi za regulaciju temperature zraka koji prolazi kroz komoru (temperatura umjeravanja). Prilikom konstruiranja komore i izmjenjivača vodilo se računa o njenoj jednostavnosti za upotrebu i cijeni izrade. Izrada i ispitivanje karakteristika predmetne komore nisu obuhvaćeni ovim radom.

## **LITERATURA**

- [1] Galović, A.: Termodinamika II, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [2] A guide to the measurment of humidity, The Institute of Measurement and Control, London, 1996.
- [3] DZM, Državni zavod za mjeriteljstvo, Vrednovanje mjernih podataka – upute za iskazivanje mjerne nesigurnosti, Zagreb, 2009.

**PRILOZI**

I. CD-R disc