

Umjeravanje etalonskog mjerila relativne vlažnosti zraka

Čurčić, Tamara

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:235:531067>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Tamara Čurčić

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

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

Student:

Tamara Čurčić

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Danijelu Šestanu i asistentu Ivanu Matasu na pruženoj pomoći i stručnim savjetima tijekom izrade ovog rada.

Tamara Čurčić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:



Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 22 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Tamara Čurčić**

JMBAG: 0035208804

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

Naslov rada na engleskom jeziku: **Calibration of standard hygrometer for relative humidity measurement**

Opis zadatka:

Potrebno je provesti postupak umjeravanja etalonskog higrometra relativne vlažnosti zraka. Za umjeravanje će se koristiti primarni generator zraka poznatog rosišta, kao i etalonski higrometar točke rose u Laboratoriju za procesna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje (FSB-LPM). Umjeravanje je potrebno provesti u najmanje pet umjernih točaka kojima će se obuhvatiti područje relativnih vlažnosti od 10 % do 90 %.

U okviru izrade diplomskog rada potrebno je:

- Dati pregled teorijskih osnova vezanih uz mjerenje relativne vlažnosti zraka.
- Opisati postupak provedbe sljedivog umjeravanja mjerila relativne vlažnosti zraka.
- Osmisliti i opisati mjerni sustav za predmetno umjeravanje te prikazati shemu spajanja.
- Sastaviti mjernu liniju i provesti umjeravanje koristeći postojeće uređaje i pomoćnu opremu koja je na raspolaganju u FSB-LPM-u.
- Opisati postupak procjene i procijeniti nesigurnost predmetnog umjeravanja.
- Prikazati rezultate umjeravanja etalonskog mjerila relativne vlažnosti zraka.

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

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

29. rujna 2022.

1. prosinca 2022.

12. – 16. prosinca 2022.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:


Doc.dr.sc. Danijel Šestan


Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD	1
2. MJERENJE VLAŽNOSTI ZRAKA – OSNOVNI POJMOVI.....	3
2.1. Vlažni zrak	3
2.2. Apsolutna i relativna vlažnost	4
2.3. Točka rose (rosište) i injište	4
2.4. Metode mjerenja vlažnosti	5
2.4.1. Direktne (apsolutne) metode	5
2.4.2. Posredne metode	6
3. UMJERAVANJE MJERILA RELATIVNE VLAŽNOSTI	8
3.1. Metoda umjeravanja pomoću primarnog generatora zraka poznatog rosišta.....	9
3.1.1. Osjetnici temperature i termometrijski otpornički most	11
3.1.2. Kontrolni higrometar točke rose	13
3.1.3. Kupka i primarni generator	14
3.1.4. Termostatirana komora i mala komora	16
3.1.5. Sušač.....	18
3.1.6. Umjeravani instrument.....	19
3.1.7. Instrumenti za mjerenje stanja okoline.....	20
3.2. Metoda usporedbenog umjeravanja	21
3.2.1. Higrometar točke rose s hlađenim ogledalom.....	24
3.2.2. Termo-higrostatirana komora.....	25
3.2.3. Pokazni instrument etalonskih mjerila	27
4. PROCJENA MJERNE NESIGURNOSTI.....	28

4.1. Mjerna nesigurnost – osnove.....	28
4.1.1. Procjena mjerne nesigurnosti tipa A	30
4.1.2. Procjena mjerne nesigurnosti tipa B.....	30
4.1.3. Standardna i proširena mjerna nesigurnost	31
4.2. Utjecajni parametri.....	32
4.2.1. Koeficijenti osjetljivosti	35
4.3. Postupak procjene mjerne nesigurnosti – metoda usporedbenog umjeravanja.....	36
4.3.1. Histereza.....	40
4.3.2. Ponovljivost.....	40
4.4. Postupak procjene mjerne nesigurnosti – metoda umjeravanja pomoću primarnog generatora.....	41
5. ANALIZA REZULTATA.....	43
5.1. Točka umjeravanja 10 %RV, 20 °C – metoda umjeravanja pomoću primarnog generatora 43	
5.1.1. Nakon provjere.....	45
5.2. Točka umjeravanja 70 %RV, 20 °C – metoda usporedbenog umjeravanja.....	46
5.2.1. Ponovljivost.....	47
5.3. Ukupni rezultat umjeravanja	48
6. ZAKLJUČAK	51
LITERATURA.....	52

POPIS SLIKA

Slika 1. Shema mjerne linije pomoću primarnog generatora zraka poznatog injišta/rošišta [4]...	10
Slika 2. Multipleksor s komunikacijskom i upravljačkom jedinicom.....	12
Slika 3. Termometrijski otpornički most.....	13
Slika 4. Higrometar točke rose	14
Slika 5. Regulator temperature niskotemperaturne kupke	15
Slika 6. Poklopac primarnog generatora	15
Slika 7. Shema niskotemperaturnog saturatora	16
Slika 8. Osjetnik umjeravanog instrumenta i osjetnik temperature smješteni unutar male komore	17
Slika 9. Mala komora unutar termostatirane komore	18
Slika 10. Adsorpcijski sušač zraka	19
Slika 11. Rotronic Hygropalm HP32 s produžnim kabelom za osjetnik [5].....	20
Slika 12. Instrument za praćenje uvjeta okoline	21
Slika 13. Shema mjerne linije za usporedbeno umjeravanje mjerila relativne vlažnosti zraka	22
Slika 14. Položaj umjeravanog instrumenta, etalonskog termometra i cjevčice za uzorkovanje unutar komore.....	23
Slika 15. Rotametar i pumpa	23
Slika 16. Izlazna cijev omotana grijačem.....	24
Slika 17. Etalonski higrometar točke rose.....	25
Slika 18. Regulator temperature i relativne vlažnosti zraka u komori	26
Slika 19. Unutrašnjost komore	26
Slika 20. Pokazni instrument higrometra točke rose.....	27
Slika 21. Izvori mjerne nesigurnosti	30
Slika 22. Primjer budžeta nesigurnosti za umjeravanje mjerila relativne vlažnosti.....	33
Slika 23. Primjer budžeta nesigurnosti za umjeravanje mjerila temperature	34
Slika 24. Normalna i pravokutna razdioba.....	35
Slika 25. Korekcije umjeravanog instrumenta pri mjerenju temperature zraka.....	50
Slika 26. Korekcije umjeravanog instrumenta pri mjerenju relativne vlažnosti zraka	50

POPIS TABLICA

Tablica 1. Korišteni osjetnici temperature i pripadni kanali	10
Tablica 2. Korištena oprema	10
Tablica 3. Točke umjeravanja instrumenta	43
Tablica 4. Etalonske vrijednosti za točku 10 %RV, 20 °C	44
Tablica 5. Vrijednosti izmjerene umjeravanjem instrumentom za točku 10 %RV, 20 °C	44
Tablica 6. Vrijednosti tlaka za točku 10 %RV, 20 °C	44
Tablica 7. Etalonske vrijednosti za točku 10 %RV, 20 °C nakon provjere	45
Tablica 8. Vrijednosti izmjerene umjeravanjem instrumentom za točku 10 %RV, 20 °C nakon provjere.....	45
Tablica 9. Vrijednosti tlaka za točku 10 %RV, 20 °C nakon provjere	46
Tablica 10. Etalonske vrijednosti za točku 70 %RV, 20 °C	46
Tablica 11. Vrijednosti izmjerene umjeravanjem instrumentom za točku 70 %RV, 20 °C	46
Tablica 12. Etalonske vrijednosti za točku 70 %RV, 20 °C – ponovljivost	47
Tablica 13. Vrijednosti izmjerene umjeravanjem instrumentom za točku 70 %RV, 20 °C – ponovljivost	47
Tablica 14. Rezultat umjeravanja.....	48

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
p_d	Pa	Parcijalni tlak vodene pare
p_s ili e_s	Pa	Tlak zasićenja
p	Pa	Ispitni tlak
e	Pa	Tlak vodene pare
e'	Pa	Parcijalni tlak vodene pare
e'_w	Pa	Parcijalni tlak vodene pare iznad površine vode
x	kg _w /kg _{sz}	Sadržaj vlage
h ili RV	%	Relativna vlažnost
U	%	Proširena mjerna nesigurnost
u	%	Standardna mjerna nesigurnost
a	%	Poluinterval pravokutne razdiobe
k	-	Faktor proširenja
t_d ili T_{dp}	°C	Temperatura rošenja
t_s	°C	Temperatura zasićenja
t ili T_a	°C	Ispitna temperatura
C_{td}	°C/mbar	Koeficijent osjetljivosti za temperaturu rošenja
C_t	°C/mbar	Koeficijent osjetljivosti za ispitnu temperaturu
C_{ps}	°C/mbar	Koeficijent osjetljivosti za tlak zasićenja
C_p	°C/mbar	Koeficijent osjetljivosti za ispitni tlak
f_s	1	Faktor povećanja tlaka za temperaturu zasićenja
f	1	Faktor povećanja tlaka
f_w	1	Faktor povećanja tlaka za vodenu paru
δh_{hys}	%	Histereza mjerila relativne vlažnosti
δh_{REP}	%	Ponovljivost mjerila relativne vlažnosti

SAŽETAK

U sklopu izrade diplomskog rada konstruirana je i sastavljena mjerna linija pomoću koje je provedeno umjeravanje etalonskog instrumenta za mjerenje relativne vlažnosti zraka. Umjeravanje je provedeno u Laboratoriju za procesna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Na početku rada dane su osnove mjerenja vlažnosti zraka te su opisani osnovni pojmovi koji se uz njega vežu. Opisane su razne metode za umjeravanje instrumenata za mjerenje relativne vlažnosti, a metode korištene u sklopu rada su umjeravanje pomoću primarnog generatora točke rose i usporedbeno umjeravanje mjerenjem temperature točke rose. Za obje metode detaljno je opisana korištena oprema te postupak umjeravanja. Prije konačnog predstavljanja rezultata mjerenja, opisan je postupak procjene mjerne nesigurnosti budući da niti jedno mjerenje nije potpuno bez procjene kvalitete rezultata. Uz mjernu nesigurnost, objašnjeni su svi pojmovi koji se javljaju pri njenom određivanju. Na kraju rada analizirani su rezultati te su prikazani tablično i grafički. Za sve točke umjeravanja dane su srednje vrijednosti dobivene referentnim instrumentom i umjeravanim instrumentom, korekcije i proširena mjerna nesigurnost.

Ključne riječi: mjerenje relativne vlažnosti, metode umjeravanja, primarni generator zraka poznatog rosišta, usporedbeno umjeravanje, mjerna nesigurnost

SUMMARY

Within this master's thesis, a measurement system was designed and assembled for the calibration of a standard relative humidity meter. Calibration was performed in the Laboratory for Process Measurement at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb. The basics of air humidity measurement and the basic terms related to humidity measurement are given. Various methods for calibration of relative humidity meters are explained. The methods used for calibration performed within this master's thesis are calibration using the primary dew-point generator and comparison calibration by measurement of dew-point and temperature of sample air. For both methods, the used equipment and the calibration procedures are described. Before the final presentation of the measurement results, the measurement uncertainty assessment is described, since measurements are incomplete without an assessment of the quality of the results. Along with the calibration uncertainty, all the terms that are relevant to its determination are explained. At the end, the results of the calibration were analyzed and displayed in a table and graphically. For all measurement points, the mean values obtained by the reference device and device under calibration are given, together with corresponding corrections and expanded measurement uncertainties.

Keywords: relative humidity measurement, calibration methods, primary dew-point generator, comparison calibration, measurement uncertainty

1. UVOD

Umjeravanje etalonskih mjerila relativne vlažnosti zraka vrlo je važna tema u industriji, u mnogim njezinim granama. Podatak o točnosti mjerila relativne vlažnosti često je ključan za smanjenje troškova energije, povećanje kvalitete proizvoda ili usluge, zdravlje i sigurnost. Postoji više metoda za umjeravanje navedenih mjerila te su neke od njih predstavljene u ovom radu. Upravo iz tog razloga tema je dosta složena te je potreban dosljedan i standardiziran pristup mjerenju relativne vlažnosti zraka. Općenito, relativnu vlažnost zraka nije jednostavno mjeriti budući da na točnost mjerenja utječu brojni parametri. Zato danas sve veći broj korisnika naglasak stavlja na procjenu nesigurnosti mjerenja. Glavni razlog za osiguravanje sljedivosti mjernih rezultata i uspostavu mjernih etalona je potreba za rezultatima mjerenja koji su prepoznatljivi u cijelom svijetu. [1] Sama sljedivost je svojstvo mjernog rezultata po kojemu se on može dovesti u vezu s referentnom vrijednošću. [2] Ta potreba za standardizacijom mjernih rezultata može se zadovoljiti samo ako se nesigurnost tj. kvaliteta mjernog rezultata procijeni prema široko priznatim metodama. Ovo je posebno važno za nacionalne umjerne laboratorije koji djeluju lokalno kao glavni izvori sljedivosti za ostale umjerne laboratorije u pojedinoj zemlji. U Republici Hrvatskoj, nositelj državnih etalona tlaka, temperature i vlažnosti je upravo Laboratorij za procesna mjerenja (LPM), koji se nalazi u sklopu Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Umjeravanje mjerila relativne vlažnosti zraka u sklopu ovog rada provedeno je u navedenom Laboratoriju za procesna mjerenja. Umjeravanje higrometra točke rose provodi se u nekoliko točaka s različitim vrijednostima relativne vlažnosti i temperature zraka, kako bi se obuhvatio mjerni raspon u kojem se instrument planira koristiti. Za instrument koji je umjeren u okviru ovog rada taj raspon obuhvaća niska i visoka injišta/rosišta. Ovime korisnik instrumenta dobiva informacije o njegovim karakteristikama u uvjetima u kojima će instrument koristiti za provedbu mjerenja. Budući da Laboratorij za procesna mjerenja ne posjeduje jedinstvenu mjernu liniju kojom bi bilo moguće jednom metodom umjeravanja pokriti cijelo radno područje instrumenta, u radu su korištene i opisane dvije metode umjeravanja: umjeravanje pomoću primarnog generatora točke rose i usporedbeno umjeravanje mjerenjem temperature točke rose kondicioniranog zraka. Na temelju rezultata umjeravanja izrađuje se potvrda o umjeravanju koja se izdaje korisniku instrumenta. Potvrda o umjeravanju sadrži sve potrebne podatke o umjeravanom mjerilu, postupku umjeravanja, rezultate s pripadajućim korekcijama i mjernim nesigurnostima te podatke o uvjetima u kojima je umjeravanje izvršeno. Izradom potvrde, postupak umjeravanja je završen. Na kraju

ovog rada prikazani su rezultati umjeravanja, pripadajuće korekcije i mjerne nesigurnosti umjeravanog higrometra te je time zadatak izvršen.

2. MJERENJE VLAŽNOSTI ZRAKA – OSNOVNI POJMOVI

Mjerenje vlažnosti zraka često je važno, kako u svakodnevnom životu, tako i za potrebe industrije. Kako bi postupak mjerenja vlažnosti zraka bio jasan, potrebno je na početku objasniti osnovne pojmove koji se uz njega vežu. Što je zapravo vlažni zrak, koja je razlika između apsolutne i relativne vlažnosti zraka, što je točka rose te ostale nepoznanice bit će razjašnjene u idućih nekoliko poglavlja.

2.1. Vlažni zrak

Vlažni zrak je, prema zakonima termodinamike, smjesa suhog zraka i vlage. Suhi zrak se u toj smjesi uvijek pojavljuje u plinovitom agregatnom stanju, dok se vlaga može javljati u sva tri agregatna stanja: plinovitom, kapljevitom te krutom. [3] Osim pojave vlage u smjesi sa zrakom, ona se može javljati i u zemnom plinu, nafti te krutinama poput drveta, papira, betona, lijekova i sl. Za sve navedene slučajeve ponekad je važno moći izmjeriti kolika je njihova vlažnost, no najčešće je to potrebno upravo za vlažni zrak, budući da je njegova primjena najraširenija.

Važan pojam koji se veže uz vlažni zrak je parcijalni tlak vodene pare p_d . Ukoliko se vlaga u smjesi sa zrakom javlja u obliku vodene pare, tada je ukupni tlak vlažnog zraka jednak sumi parcijalnih tlakova njegovih sudionika, prema Daltonovu zakonu. Osim parcijalnog tlaka vodene pare, također je važan i tlak zasićenja p_s koji ovisi o temperaturi vlažnog zraka. Upravo nam odnos između parcijalnog tlaka vodene pare i tlaka zasićenja govori o tome radi li se o nezasićenom ili zasićenom vlažnom zraku. Ukoliko je parcijalni tlak vodene pare p_d manji od tlaka zasićenja p_s radi se o nezasićenom zraku, koji još uvijek ne sadrži maksimalnu količinu vodene paru koju pri toj temperaturi može primiti. Što je temperatura zraka veća to je veći i tlak zasićenja vodene pare u zraku što znači da zrak više temperature može sadržavati veću količinu vodene pare, a da ne dođe u stanje zasićenog zraka. Kada parcijalni tlak vodene pare naraste iznad tlaka zasićenja, pri određenoj temperaturi, zrak postaje zasićen a višak vodene pare se iz njega izlučuje u formi kondenzata ili inja na temperaturama nižim od 0 °C. Zasićeni vlažni zrak može sadržavati kapljeviti kondenzat ili vlagu u obliku krutine, ovisno o tome je li temperatura zraka iznad ili ispod injišta vode. [3]

Za opisivanje stanja vlažnog zraka potrebno je poznavati njegove osnovne veličine stanja poput tlaka i temperature, ali osim njih, uspostavljene su i druge veličine koje ga detaljnije opisuju.

Veličina pod nazivom sadržaj vlage x je definirana kao omjer mase vodene pare i mase suhog zraka, odnosno broja kilograma vodene pare po kilogramu suhog zraka. Osim sadržaja vlage za opisivanje stanja vlažnog zraka koriste se i parcijalni tlakovi pa tako omjer parcijalnih tlakova vodene pare i suhog zraka ujedno predstavlja i molni omjer tih sudionika. [3]

2.2. Apsolutna i relativna vlažnost

Kada je riječ o opisivanju vlažnosti zraka, najčešće se koristi pojam relativne vlažnosti. No, potrebno je pojasniti i pojam apsolutne vlažnosti budući da pojam relativne vlažnosti ima smisla samo u području nezasićenog vlažnog zraka. Najjednostavnije rečeno, apsolutni način izražavanja količine vodene pare govori o tome kolika je količina, masa ili volumen vodene pare u odnosu na količinu, masu ili volumen zraka (vlažnog ili suhog). Dok se relativna vlažnost definira kao omjer parcijalnog tlaka vodene pare i tlaka zasićenja te samim time njezine vrijednosti se kreću između 0 i 1. [3] Odnosno, češće se izražava u postocima pa se vrijednosti kreću u intervalu između 0 % i 100 %. Način opisivanja stanja vlažnog zraka preko relativne vlažnosti često je najjednostavniji za shvaćanje i korištenje jer govori o tome koliko je vodene pare trenutno prisutno u zraku u odnosu na maksimalnu količinu vodene pare koju zrak može sadržavati. Izražavanje u postocima jasno daje do znanja koliko je promatrani zrak blizu ili daleko od postizanja stanja zasićenosti. Kao što je već spomenuto, tlak zasićenja ovisi o temperaturi promatranog vlažnog zraka, a samim time i relativna vlažnost ovisi o temperaturi. Zaključno, snižavanjem temperature zraka koji sadrži određenu količinu vodene pare njegova relativna vlažnost raste jer se smanjuje maksimalna moguća količina vodene pare koju može sadržavati, a količina vodene pare ostaje ista. U ovom radu vlažnost zraka bit će mjerena i opisana upravo postocima relativne vlažnosti.

2.3. Točka rose (rosište) i injište

Postoje mnogi parametri koji se koriste za opisivanje vlažnosti plina. Međutim, vlažnost se može u potpunosti opisati jednim parametrom (bilo kojim od njih) ako su poznati tlak i temperatura plina. Mnogi nacionalni laboratoriji su za primarni parametar izražavanja vlažnosti zraka odabrali temperaturu rošenja. [1] Često je prilikom mjerenja vlažnosti zraka od velike važnosti temperatura pri kojoj zrak postaje zasićen tj. u njemu se stvara kondenzat ili inje. Temperatura pri kojoj se javlja ta pojava naziva se točka rose ili rosište. Kada vlažni zrak dosegne točku rose prilikom svog hlađenja to znači da je postignuto stanje zasićenog zraka. Ukoliko je temperatura iznad injišta vode višak vlage izlučuje se u obliku kapljevito kondenzata, dok se za temperature ispod injišta vode

višak vlage izlučuje u krutom stanju, u formi ledenog inja. Temperatura pri kojoj krene izlučivanje vlage u obliku inja naziva se injište. Temperatura rošenja vrlo je važna u brojnim situacijama kada nije poželjno da dođe do kondenzacije. U tim situacijama potrebno je održavati temperaturu vlažnog zraka iznad temperature rošenja. Osobito je zahtjevno provoditi mjerenja vlažnosti zraka u slučajevima kada je njegova temperatura rošenja iznad temperature okoline. U tim slučajevima je potreban dodatan oprez kako ne bi došlo do kondenzacije vodene pare u mjernoj liniji a time i pogrešnih rezultata mjerenja. Postoji više načina, a time i instrumenata za mjerenje temperature rošenja zraka, a jedan od najpreciznijih je higrometar točke rose s hlađenim ogledalom. Ovaj instrument ostvaruje strujanje vlažnog zraka preko ogledala koje je hlađeno s mogućnošću precizne regulacije temperature. U trenutku kada se na ogledalu počne stvarati sloj vode ili leda, očitava se njegova temperatura te se ona smatra rosištem ili injištem. Također, informacija o relativnoj vlažnosti zraka govori o tome koliko je mjereni vlažni zrak blizu zasićenja. Ukoliko je relativna vlažnost visoka, tj. blizu 100 % njegova temperatura je vrlo blizu temperature rošenja, a u trenutku kada relativna vlažnost dosegne iznos od 100 % tada je zrak maksimalno zasićen te će daljnjim hlađenjem doći do izlučivanja viška vlage.

2.4. Metode mjerenja vlažnosti

Budući da je mjerenje vlažnosti zraka vrlo rasprostranjeno mjerenje te je informacija o njegovoj apsolutnoj i/ili relativnoj vlažnosti često potrebna, postoje brojne metode kojima se ono može mjeriti. Podatak o vlažnosti zraka potreban je kako bi stanje promatranog zraka bilo u potpunosti poznato. Metode i instrumenti za mjerenje variraju od vrlo jeftinih i rasprostranjenih, koji se mogu koristiti za kućne potrebe, do vrlo skupih i preciznih instrumenata koji se koriste za posebne svrhe. Sofisticirane metode i instrumenti potrebni su u situacijama gdje je od presudne važnosti vrlo visoka točnost rezultata mjerenja te za potrebe umjeravanja o kojemu će biti riječ malo kasnije u radu. Metode mjerenja vlažnosti dijele se na direktne (apsolutne) i posredne metode.

2.4.1. Direktne (apsolutne) metode

Direktne metode mjerenja vlažnosti omogućuju direktno određivanje veličina stanja. Moguće je odrediti razne veličine koje opisuju promatrani vlažni zrak te se odnose na količinu vodene pare u njemu. Neke od veličina su maseni omjer, maseni udio odnosno specifična vlažnost, apsolutna

vlažnost, volumni udio, molni udio, parcijalni tlak vodene pare, rosište, injište i sl. Najvažnije i najčešće korištene direktne metode i instrumenti su gravimetrijska metoda, psihometri te higrometri točke rose. Kod gravimetrijske metode vodena para se fizički odvaja iz vlažnog zraka te se njihovim vaganjem dolazi do masenog omjera iz kojeg je moguće izračunati ostale potrebne higrometrijske parametre. Upravo ta metoda je najtočnija od svih, ali to sa sobom donosi i nedostatke vezane uz cijenu i kompleksnost metode. Iduća od direktnih tj. apsolutnih metoda je mjerenje vlažnosti psihrometrom. Psihrometar mjeri vlažnost na principu evaporativnog hlađenja te sadrži dva termometra, jedan suhi, a drugi vlažni. Upravo na temelju temperatura tih termometara se određuje relativna vlažnost zraka. Mogu raditi u širokom rasponu vrijednosti relativnih vlažnosti i temperatura, no kako bi mjerenje bilo uspješno provedeno potrebna je relativno velika količina vlažnog zraka. Posljednja direktna metoda za mjerenje vlažnosti koju je potrebno istaknuti je mjerenje higrometrima točke rose. To su instrumenti koji se sastoje od termometra, ogledala, hladila, izvora svjetlosti i fotodetektora. Princip rada je prestrujavanje promatranog zraka preko polirane površine ogledala čija temperatura je poznata. U trenutku kada fotodetektori prepoznaju pojavu kondenzata temperatura ogledala jednaka je temperaturi rošenja zraka koji struji preko njegove površine. Moguć je rad u još širem rasponu temperatura u odnosu na psihometre te se često koriste kao etaloni za umjeravanje drugih higrometara. Iz navedenih razloga relativno su skupi.

2.4.2. Posredne metode

Kod posrednih metoda mjerenja vlažnosti prati se promjena neke veličine koja je posredno vezana uz promjenu vlažnosti te se na taj način dobiva tražena informacija. Često je mjerena veličina neka čiju je vrijednost lako izmjeriti pa su takve metode nerijetko jednostavnije i jeftinije od direktnih. Od posrednih metoda i instrumenata za mjerenje vlažnosti najvažnije je istaknuti higrometre s elastičnim elementima, otporničke higrometre te dielektrične (kapacitivne) higrometre. Higrometri s elastičnim elementima relativno su jednostavni te se najčešće koriste za mjerenje relativne vlažnosti u prostorijama. Sastoje se od niti organskog podrijetla čija se duljina mijenja u ovisnosti o vlažnosti, opruge te mehanizma koji pomiče kazaljku ili pisalo instrumenta. Rade u mjernom području od 20 %rv do 80 %rv (pri sobnim temperaturama) te im tipična mjerna nesigurnost iznosi 5 %rv do 15 %rv. Relativno su jeftini, ne trebaju izvor za napajanje te u potpunosti moraju biti izloženi zraku čija se vlažnost mjeri. Nedostaci su im histereza, spor odziv i trajna oštećenja kod potpunog ovlaživanja ili isušivanja. Otpornički higrometri sadrže

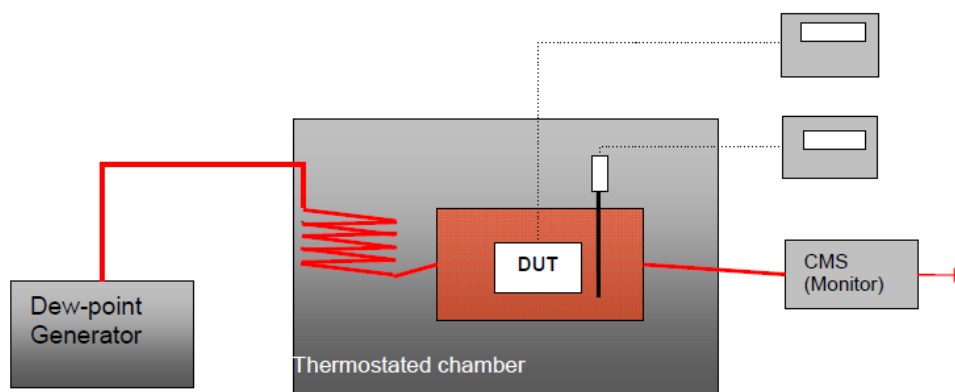
elektroničku komponentu kojoj se ovisno o količini vodene pare u zraku mijenja električni otpor. Na temelju promjene električnog otpora koji je u vezi s relativnom vlažnosti dobiva se potrebna informacija o vlažnosti zraka. Rade u mjernom području od 5 %rv do 95 %rv, pri temperaturama od -30 °C do 60 °C, dok se specijalne izvedbe mogu koristiti i u temperaturnim područjima između -50 °C i 200 °C. Tipične mjerne nesigurnosti su im reda veličine 2 %rv do 3 %rv. Linearnost im je veća tj. bolja na visokim vlažnostima. Potrebno ih je često umjeravati budući da kondenzat može razrijediti polimernu membranu osjetnika što uzrokuje promjenu karakteristike osjetnika tj. promjenu ovisnosti električnog otpora o vlažnosti. Osim toga, nedostaci su im histereza, osjetljivost na onečišćenja i ogrebotine te velika ovisnost karakteristike o temperaturi. Zadnja od navedenih posrednih metoda za mjerenje vlažnosti je mjerenje dielektričnim higrometrima. Slično kao i kod otporničkih higrometara također sadrže električnu komponentu, no u ovom slučaju ovisno o količini vodene pare dolazi do promjene električnog kapaciteta osjetnika. Osjetnici se sastoje od metalnih elektroda (od kojih je barem jedna izvedena u obliku mrežice kako bi se omogućio kontakt dielektrika s okolišnim zrakom) između kojih se nalazi dielektrik. Rade u mjernom području od 5 %rv do 100 %rv, pri temperaturama od -30 °C do 60 °C, dok se specijalne izvedbe koriste i u temperaturnim područjima između -40 °C i 200 °C. Tipične mjerne nesigurnosti kod dielektričnih higrometara relativne vlažnosti su reda veličine 2 %rv do 3 %rv. Suprotno nego kod otporničkih termometara, linearnost im je veća (bolja) na niskim vlažnostima. Kondenzat ih općenito ne oštećuje, ali može uzrokovati promjenu karakteristike. Nedostaci ovog tipa higrometra su histereza i problemi s konstrukcijom i izradom vrlo tankog higroskopskog dielektrika.

3. UMJERAVANJE MJERILA RELATIVNE VLAŽNOSTI

Umjeravanje je skup postupaka kojima se uspostavlja odnos između vrijednosti mjernih veličina koje pokazuje umjeravani instrument i odgovarajućih vrijednosti koje u istim uvjetima pokazuje etalonsko mjerilo. Umjeravanje mjerila relativne vlažnosti zraka provodi se u okruženju uzorka zraka stabilne vlažnosti pomoću umjerenog referentnog higrometra točke rose. U postupcima umjeravanja mjerila relativne vlažnosti zraka potreban je i umjereni termometar. Referentni higrometar točke rose umjeren pomoću primarnih etalona apsolutne vlažnosti. Termometar je umjeren ili usporedbeno s drugim etalonskim termometrom ili u termometrijskim fiksnim točkama. [1] U ovom radu mjerna veličina koja se prati je relativna vlažnost, a umjeravani instrument je higrometar relativne vlažnosti. On se umjerava korištenjem državnog etalona vlažnosti. Etalon je mjerilo koje je dogovorom, normom ili zakonom utvrđeno kao utjelovljenje određene mjerne jedinice. Takva mjerila namijenjena su za određivanje, ostvarivanje, čuvanje ili obnavljanje mjerne jedinice kroz umjeravanje relevantnih instrumenata. Državni etalon vlažnosti u Republici Hrvatskoj nalazi se upravo na Fakultetu strojarstva i brodogradnja, u Laboratoriju za procesna mjerenja. Iz tog razloga postupak umjeravanja instrumenata za mjerenje vlažnosti odvijaju se u sklopu navedenog laboratorija. Osim etalona za vlažnost, tamo se nalaze i državni etaloni za tlak i temperaturu. Postupak umjeravanja vrlo se često provodi za razne instrumente budući da korisnici tih instrumenata najčešće moraju imati informaciju o tome koliko se rezultati mjerenja na njihovim instrumentima razlikuju od stvarnih mjerenih vrijednosti. Podatak o nesigurnosti rezultata umjeravanja ključan je parametar koji se koristi za daljnju procjenu nesigurnosti rezultata mjerenja provedenih umjerenim instrumentom. Osim u situacijama kada se npr. higrometar koristi u neke kućne svrhe gdje nema potrebe za velikom točnošću i preciznošću mjerenja, potrebno je poznavanje mjerne nesigurnosti. Upravo se postupkom umjeravanja dolazi do tog podatka te se u ovom radu obrađuju dvije metode umjeravanja instrumenata za mjerenje relativne vlažnosti. Metode će biti detaljno opisane i vizualno prikazane u realnim uvjetima u idućih nekoliko poglavlja. Vrlo je važno da metoda i uvjeti umjeravanja budu dobro opisani u potvrdi o umjeravanju. Također, treba navesti komponente nesigurnosti koje se odnose na instrument koji se umjerava. Poznavanje homogenosti temperature i tlaka vodene pare uzorka zraka koji je korišten za provedbu mjerenja vrlo je važno za određivanje nesigurnosti umjeravanja mjerila relativne vlažnosti zraka. [1]

3.1. Metoda umjeravanja pomoću primarnog generatora zraka poznatog rosišta

Ova metoda podrazumijeva umjeravanje pomoću generatora točke rose. Takav način umjeravanja vrlo je precizan te je potreban samo za najtočnija mjerenja. Mjerna linija sastoji se od velikog broja dijelova, a sve kreće s kompresorom zraka. Zrak iz prostorije se komprimira pomoću kompresora te se pohranjuje u spremnik iz kojeg se cijevima vodi do laboratorija gdje se provodi mjerenje. Zrak zatim ulazi u sušač kojim se predkondicionira na temperaturu rošenja od oko $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Iz sušača zrak odlazi u filter te iz filtera u precizan regulator tlaka. Ponekad klijenti čiji instrument se umjerava traže da se mjerenje provede pri određenom protoku zraka, ukoliko ne, mjerenje se vrši pri nekom malom protoku kakav bi bio otprilike u normalnim uvjetima. Protok se regulira regulatorom tlaka i igličastim ventilom ugrađenim u rotametar. Nakon prolaska kroz rotametar, zrak ulazi u niskotemperaturni saturator u kojem se postiže tražena temperatura rošenja. Unutar niskotemperaturnog saturatora zrak prolazi kroz izmjenjivač topline u formi cijevne zavojnice uronjene u alkohol koji je ohlađen na potrebnu temperaturu. Nakon cijevne zavojnice zrak ulazi u saturacijsku komoru u kojoj nastrijava preko površine vode ili leda dok se ne zasiti vodenom parom. Tako pripremljeni zrak ulazi u termostatiranu komoru gdje se prolaskom kroz izmjenjivač topline zagrijava/hladi na potrebnu temperaturu. Takav uzorak zraka za koji poznata temperatura rošenja uvodi se u malu komoru u koju su postavljeni umjeravani instrument, etalonski termometri i etalonsko mjerilo tlaka. Dio zraka generiranog u primarnom generatoru također se odvodi na kontrolni etalonski higrometar točke rose, u ovom slučaju proizvođača MBW, kojim se kontrolira da li je primarnim generatorom proizveden zrak očekivanog injišta/rosišta. Tijekom umjeravanja relativne vlažnosti zraka očitavaju se s umjeravanog instrumenta te se uspoređuju s pripadnim vrijednostima određenim na temelju injišta/rosišta ostvarenih primarnim etalomom i temperaturom uzroka zraka izmjerenom umjerenim etalonskim termometrima. Prije samog početka mjerenja potrebno je izvršiti tlačnu probu. Tlačna proba provodi se podešavanjem pretlaka uzorka zraka u sustavu na otprilike 40 mbar i potvrđivanjem da pritom nema protoka zraka kroz sustav. Za potrebe mjerenja potrebno je cijeli sustav dobro brtviti kako ne bi došlo do curenja zraka pa se na mjestima koja je potrebno dodatno zabrtviti koristi prikladno brtvilo, u ovom slučaju korišten je „*blue tack*“. Shema opisane mjerne linije (Slika 1) prikazuje pojednostavljeni mjerni sustav s generatorom točke rose. Na slici se vide primarni generator, termostatirana komora, mala komora, umjeravani instrument, etalonski termometar te pokazne jedinice instrumenata.



Slika 1. Shema mjerne linije pomoću primarnog generatora zraka poznatog injišta/rosišta [4]

Nakon ovog kratkog opisa mjernog sustava potrebno je opisati svu korištenu opremu. Za potrebe mjerenja korišteno je 6 etalonskih osjetnika temperature koji će biti detaljnije opisani u sljedećim poglavljima. Osjetnici su bili povezani na termometrijski otpornički most a u tablici 1 su prikazani prema kanalima mosta na koje su bili povezani. Ostala korištena oprema navedena je u tablici 2 te će svaki instrument pojedinačno biti opisan kasnije.

Tablica 1. Korišteni osjetnici temperature i pripadni kanali

Kanal	Oznaka termometra
0	TEPOT20 CVD
1	TEPOT21 CVD
2	Standardni PT100 - 385
3	Standardni PT100 - 385
4	WIKA LRS SAT CO
5	MBW LHX PRT2

Tablica 2. Korištena oprema

Oprema	Oznaka	Proizvođač	Model
Higrometar točke rose	VLHTR03	MBW calibration	3737 LHX
Otpornički most	EOMOS03	ASL LTD.	F700
Kupka	VLKUP01	Kambič	OB-50LT

Primarni generator	VL1TG01		
Digitalni barometar		VAISALA	PTB330
Komora	VLKOM01	KOTTERMANN	2306
Sušlač		PNEUDRI (dh)	
Etalonski otpornik	EOFIX05	Tinsley	
Umjeravani instrument		Rotronic	HP31/32/GTS
Instrument za mjerenje stanja okoline	TEOKO09	testo	176P1
Instrument za mjerenje stanja okoline	TEOKO11	testo	175H1

Tijekom mjerenja koriste se *računalni programi* za prikupljanje podataka s mjernih instrumenata. Ovi programi razvijeni su u Laboratoriju za procesna mjerenja. „*Bridge logger*“ je program pomoću kojeg se mogu pratiti temperature izmjerene svim korištenim osjetnicima temperature. Potrebno je definirati koji osjetnik je spojen na koji ulazni kanal u multipleksora. „*LPM logger*“ koristi se za praćenje tlaka, tlak se mjeri na dva mjesta u sustavu, u saturatoru i maloj komori u kojoj se nalazi umjeravani instrument. Također, na računalu se koristi *program „HumiCalc“* pomoću kojeg se, na temelju izmjerenih vrijednosti temperature i rosišta/injišta zraka mogu odrediti pripadne vrijednosti relativni vlažnosti. Na kraju mjerenja podaci iz programa za praćenje se spremaju u datoteke na računalu. Kasnije će se ove vrijednosti uspoređivati s vrijednostima izmjerenim pomoću umjeravanog higrometra te će se na temelju toga dobiti podaci o njegovim odstupanjima. Korišteni etalonski instrumenti su umjereni te se vrijednosti koje su njima izmjerene smatraju referentnima. Metoda umjeravanja pomoću primarnog generatora je puno preciznija od usporedbene budući da je i korištena oprema preciznija. Metoda usporedbenog umjeravanja opisana je poglavlju 3.2.

3.1.1. Osjetnici temperature i termometrijski otpornički most

Tijekom postupka umjeravanja korišteno je 6 osjetnika temperature, koji su navedeni u tablici 1. Osjetnici temperature s oznakama TEPOT20 CVD, TEPOT21 CVD i WIKA LRS SAT CO uronjeni su u kupku i njima se mjeri temperatura rosišta/injišta. Jedan od osjetnika u kupki uronjen je dublje od drugoga, kako bi se dobile okvirne informacije o temperaturnim gradijentima u kupki za vrijeme umjeravanja. Dva osjetnika s oznakom Standardni PT100 – 385 postavljeni su u komori s umjeravanim instrumentom te mjere temperaturu zraka u njoj. Osjetnik s oznakom MBW LHX PRT2 ugrađen je u ogledalo kontrolnog etalonskog higrometra točke rose (MBW). Svi navedeni

osjetnici su platinski otpornički osjetnici temperature kojima se s promjenom temperature mijenja električni otpor. Električni otpori osjetnika mjere se pomoću termometrijskog otporničkog mosta. Osjetnici su na most spojeni četverožilno. Izmjereni električni otpori se prikupljaju pomoću računala te se preračunavaju u pripadne temperature. Za preračunavanje se koriste jednadžbe i koeficijenti dobiveni umjeravanjem etalonskih osjetnika temperature. Budući da se tijekom ovog mjerenja koristi 6 osjetnika temperature, oni su s termometrijskim otporničkim mostom povezani preko multipleksora (Slika 2) i njegove upravljačke jedinice. Upravo multipleksor omogućuje istovremeno spajanje više osjetnika na isti otpornički most (Slika 3). Za mjerenje otpora platinskih otporničkih termometara korišten je izmjenični otpornički most ASL F700 čiji je proizvođač ASL *Limited*. U kombinaciji s etalonskim otpornikom nazivnog otpora $100\ \Omega$ ovaj most ima mogućnost mjeriti električne otpore u rasponu od $0\ \Omega$ do $400\ \Omega$ s rezolucijom od 1 ppm. Sami most ima jedan ulazni kanal za spajanje osjetnika.



Slika 2. Multipleksor s komunikacijskom i upravljačkom jedinicom



Slika 3. Termometrijski otpornički most

3.1.2. Kontrolni higrometar točke rose

Higrometar točke rose proizvođača MBW (Slika 4) koristi se kao kontrolni instrument u sklopu metode umjeravanja pomoću primarnog generatora. Instrument ima široko mjerno područje kojim su obuhvaćena injišta/rosišta zraka od $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. U sebi ima hladeno ogledalo preko kojeg struji zrak. Ogledalo se hladi do formiranja sloja kondenzata, nakon čega se temperatura ogledala precizno regulira kako bi se debljina tog sloja održavala konstantnom. Važno je da ogledalo nema nikakvih prljavština po sebi jer se onda led ili kondenzat neće ravnomjerno stvarati po njegovoj površini. Također je bitno da protok zraka nije prevelik kako ne bi došlo do odnošenja leda/kondenzata s površine ogledala. Debljina sloja kondenzata se prati pomoću snopa svjetlosti koji se od ogledala reflektira na fotoosjetnik. Debljina sloja kondenzata određuje se na temelju intenziteta svjetlosti koja se reflektirala na fotoosjetnik. Nakon završenog mjerenja prespaja se cijev koja ide na kontrolni instrument (MBW) s ulaza u komoru u kojoj se nalazi umjeravani instrument na njen izlaz. Razlika u injištu/rosištu zraka izmjenenom s kontrolnim higrometrom spojenim na ulaz i izlaz komore koristi se za procjenu mjernih nesigurnosti zbog postojanja gradijenata injišta/rosišta u samoj komori.

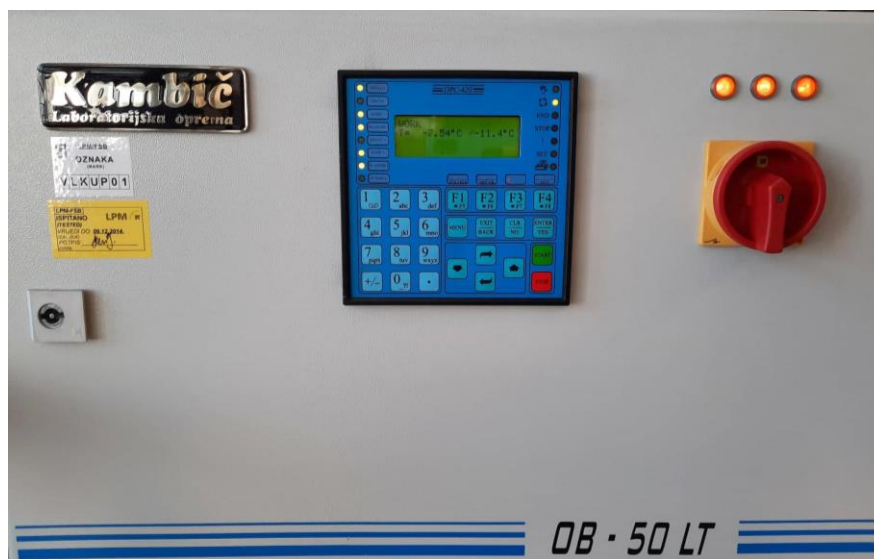


Slika 4. Higrometar točke rose

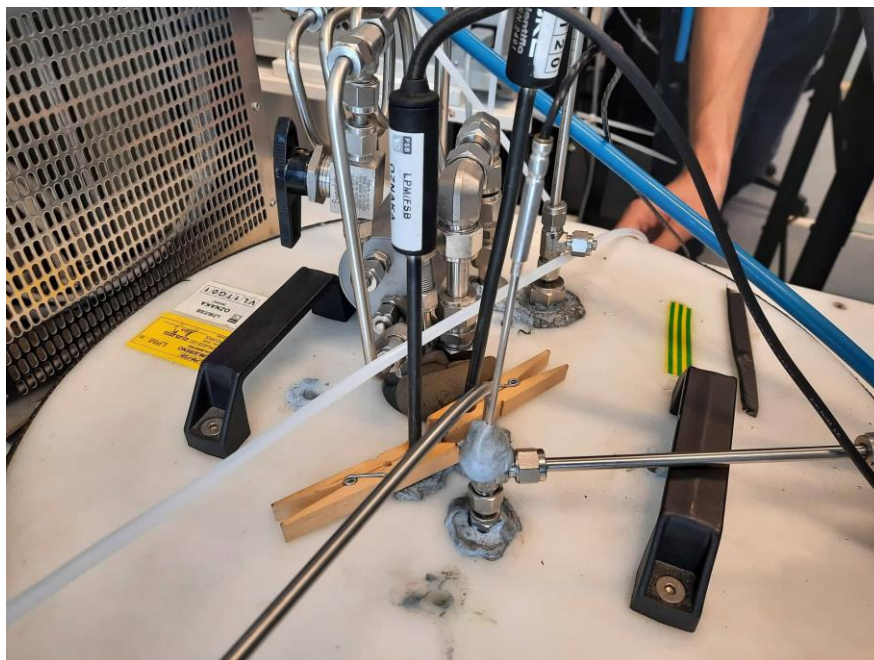
3.1.3. Kupka i primarni generator

Za generiranje zraka željene temperature rošenja korišteni su kupka (Slika 5) i primarni generator (Slika 6). Jezgra generatora rosišta je saturator. U principu, uzorak plina (najčešće zrak) je u termodinamičkoj ravnoteži s vodom ili ledom visoke čistoće, koji se nalazi u saturatoru. Stoga se temperatura rošenja plina u saturatoru može jednostavno odrediti mjerenjem temperature saturatora tj. temperature zraka u saturatoru. U stvarnosti, ne postoji takav saturator u kojem je postignuta potpuna termodinamička ravnoteža. Također, temperatura i tlakovi u saturatoru ne mogu se mjeriti s nultom nesigurnošću. Konačno, ne postoje cijevi u kojima se molekule plina ne apsorbiraju/adsorbiraju. Navedeni aspekti nesavršenosti čine osnovu za analizu nesigurnosti generatora rosišta. [1] Na poklopcu primarnog generatora vide se cijevi ulaza i izlaza zraka iz saturatora. Također vide se dva platinska otpornička osjetnika temperature koja su uronjena u kupku. Alkohol u kupki hladi se na željenu temperaturu rošenja. Željena temperatura rošenja namješta se na kupki pomoću regulatora te se trenutna temperatura vidi na njezinom ekranu. Kada kupka postigne željenu temperaturu tek se tada pušta zrak kroz nju kako bi nastrujavao preko površine vode i tako se zasićivao. Ukoliko bi zrak bio pušten ranije tada bi se on zasićivao dok ga je potrebno još dosta hladiti pa bi se uzaludno trošila voda. Na shemi niskotemperaturnog saturatora (Slika 7) vidi se cijev kroz koju zrak ulazi u cijevnu zavojnicu koja predstavlja izmjenjivač topline. Kroz tu cijevnu zavojnicu dolazi do izmjene topline između zraka i alkohola u kupki, gdje zrak postiže temperaturu alkohola. Zrak postignute željene temperature dolazi u saturator tj. struji preko površine vrlo čiste deionizirane vode te se zasićuje do zadane vlažnosti tj.

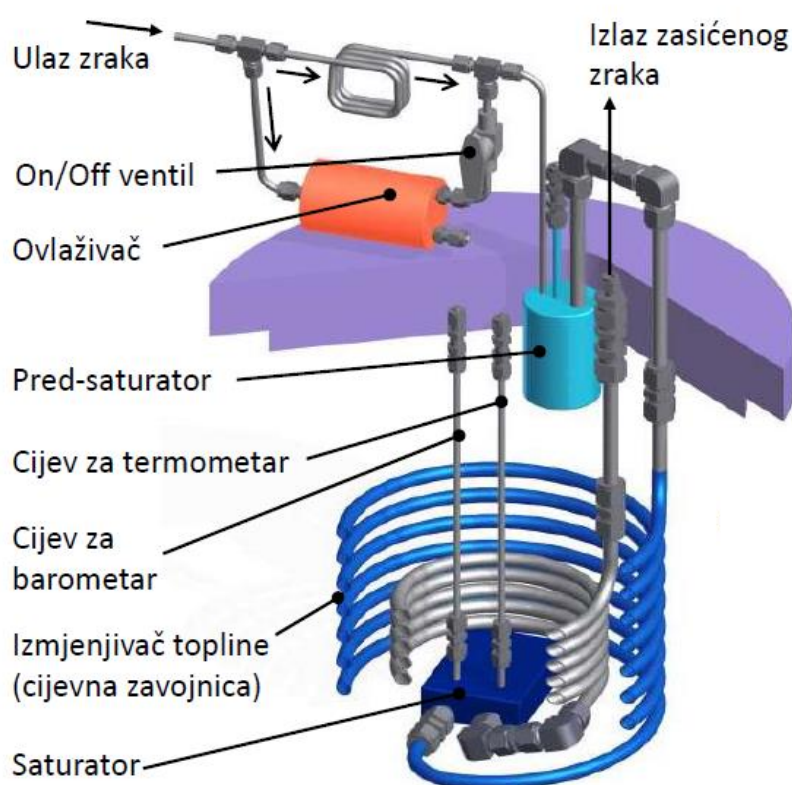
zadanog injišta/rošišta. Na saturator se spajaju termometar i barometar na za to predviđena mjesta. Radno područje takvog niskotemperaturnog saturatora je od $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kod generiranja zraka niskih vlažnosti, za povezivanje saturatora i umjeravanog higrometra potrebno je koristiti cijevi sa što glađim površinama unutarnjih stijenki kao i 100 %-tno brtvljenje na spojevima cijevi. Također, kada se radi s visokim temperaturama rošenja tj. kada je ona viša od temperature okoline potrebno je te cijevi, koje spajaju saturator i komoru, toplinski izolirati i dodatno grijati kako ne bi došlo do kondenzacije na njima.



Slika 5. Regulator temperature niskotemperaturne kupke



Slika 6. Poklopac primarnog generatora

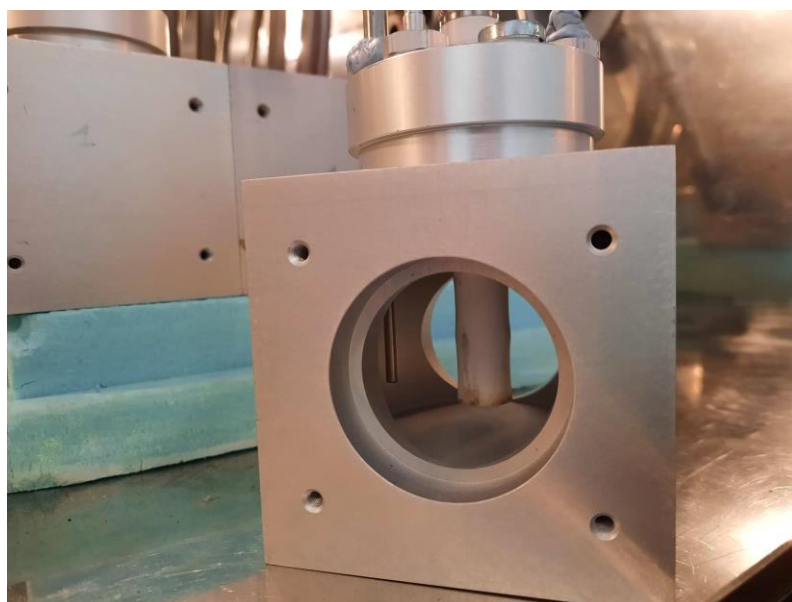


Slika 7. Shema niskotemperaturnog saturatora

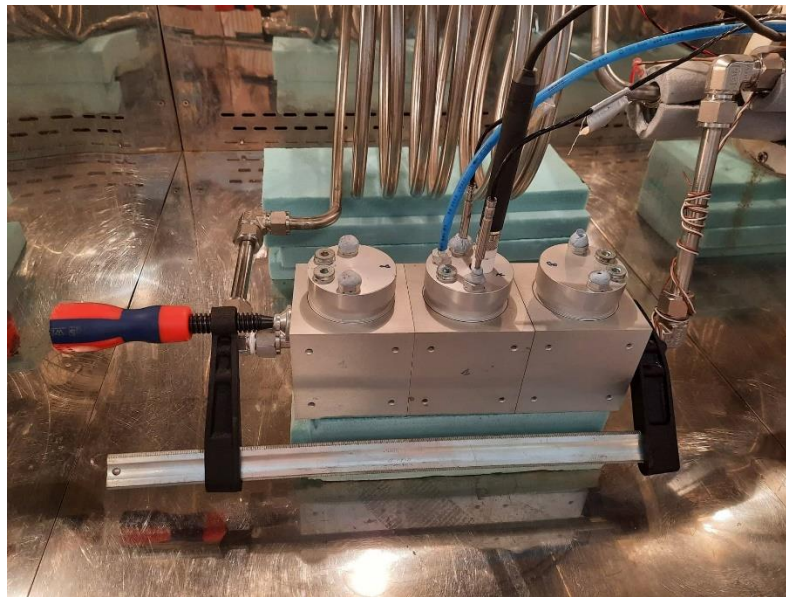
3.1.4. Termostatirana komora i mala komora

Umjeravani instrument postavlja se u malu komoru (Slika 8) koja se nalazi unutar termostatirane komore kontroliranih uvjeta (Slika 9). Temperatura u termostatiranoj komori kontrolira se pomoću regulatora ugrađenog u nju, toplinski je izolirana te ima relativno veliki radni volumen (oko 200 l). Unutar komore nalazi se ventilator pomoću kojeg se nastoji ostvariti što jednolikija raspodjela temperature zraka u njenom radnom volumenu. Zasićeni zrak iz saturatora prolazi kroz cijevni snop u komori te struji kroz malu komoru preko osjetnika umjeravanog instrumenta. Umjeravani instrument se vrlo pažljivo smješta u malu komoru kroz koju će strujati zrak poznate temperature rošenja. U neposrednoj blizini umjeravanog instrumenta postavljena su dva osjetnika temperature (na različitim visinama) te etalonsko mjerilo tlaka. Svi otvori na maloj komori moraju biti dobro zabrtvljeni kako ne bi došlo do propuštanja nastrujavanog zraka. U termostatiranu komoru ulazi pripremljeni zrak, a isti takav zrak bi trebao izaći iz komore ako je cijeli sustav dobro zabrtvljen. Tlak zraka u komori tijekom mjerenja se održava na otprilike 1020-1030 hPa. Tlakovi se prate

pomoću digitalnog etalonskog barometra koji pokazuje vrijednosti tlaka u glavnoj saturacijskoj komori primarnog generatora i maloj komori za umjeravani instrument. U normalnom radu razlika tlaka između saturatora i instrumenta koji se umjerava je < 100 Pa. [1] Protok zraka koji nastrojava preko osjetnika umjeravanog instrumenta iznosi otprilike 0,5 l/min. Protok se namješta pomoću preciznog ventila ugrađenog u rotametar, a to je instrument za mjerenje i regulaciju protoka. Rotametar ima skalu u mm pa se pomoću programa „Yokogawa rotametri“ taj iznos pretvara u protok u l/min. U ovom slučaju položaj plovka rotametra namješten je na 50 mm, što je odgovara protoku od otprilike 1 l/min. Pola od tog protoka šalje se kroz kontrolni higrometar, a druga polovica kroz termostatiranu komoru. U trenutku kada je izlaz iz komore zatvoren želi se postići protok od 0 l/min, kako bi se potvrdilo da cijeli sustav dobro brtvi.



Slika 8. Osjetnik umjeravanog instrumenta i osjetnik temperature smješteni unutar male komore



Slika 9. Mala komora unutar termostatirane komore

3.1.5. Sušać

Sušać (Slika 10) je uređaj koji smanjuje i održava razinu vlage u zraku. U ovom slučaju, to je uređaj u kojem se zrak predkondicionira na temperaturu rošenja od otprilike $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$, što je potrebno za ispravan rad saturatora. Sušenjem zraka prije ulaska u saturator, i samog procesa zasićivanja zraka na zadanu temperaturu rošenja, povećava se efikasnost zasićivanja pa je zrak moguće zasititi pri većim protocima nego što bi to bilo moguće bez prethodnog sušenja. Na ulazu i izlazu iz sušača nalaze se ventili koji služe za otvaranje i zatvaranja protoka kroz cijeli mjerni sustav. Proizvođač korištenog sušača je *Domnick Hunter*.



Slika 10. Adsorpcijski sušač zraka

3.1.6. Umjeravani instrument

Umjeravani instrument je *Rotronic Hygropalm HP32* (Slika 11). To je ručni instrument kojim se mjerenja mogu provoditi na licu mjesta. Instrument bilježi relativnu vlažnost, temperaturu i psihometrijske parametre zraka. Ima osjetnik na vrhu koji je odvojiv od pokazne jedinice što omogućuje jednostavnije rukovanje njime. Osjetnik je vrlo osjetljiv te se treba izbjegavati dodir s njim kako na njemu ne bi ostale nečistoće. Ukoliko dođe do stvaranja nečistoća na osjetniku to može znatno utjecati na točnost rezultata mjerenja. Umjeravani instrument postavljen je u malu komoru unutar termostatisane komore gdje je preko njega nastrujavao zrak zasićen u primarnom generatoru. Rezultati mjerenja prikazuju se na ekranu instrumenta.



Slika 11. Rotronic Hygropalm HP32 s produžnim kabelom za osjetnik [5]

3.1.7. Instrumenti za mjerenje stanja okoline

Tijekom procesa umjeravanja važno je pratiti i snimati stanje zraka u prostoriji u kojoj se nalazi mjerna linija. To se prati instrumentima za mjerenje uvjeta okoline. Instrumentom testo 176P1 (Slika 12) laboratorijske oznake TEOKO09 praćeni su podaci o vrijednostima tlaka, a instrumentom testo 175H1 laboratorijske oznake TEOKO11 praćeni su podaci o vrijednostima relativne vlažnosti i temperature zraka u laboratoriju.

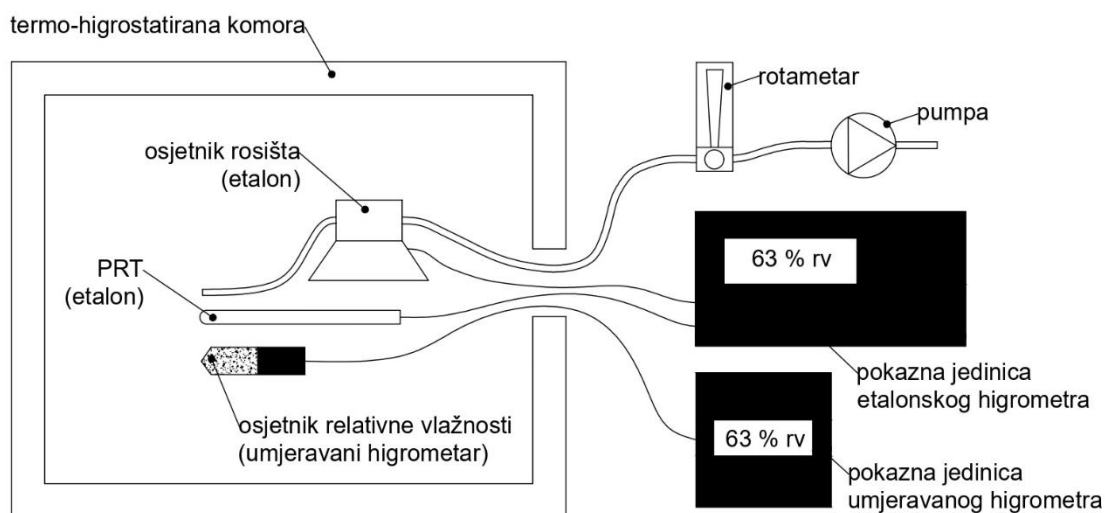


Slika 12. Instrument za praćenje uvjeta okoline

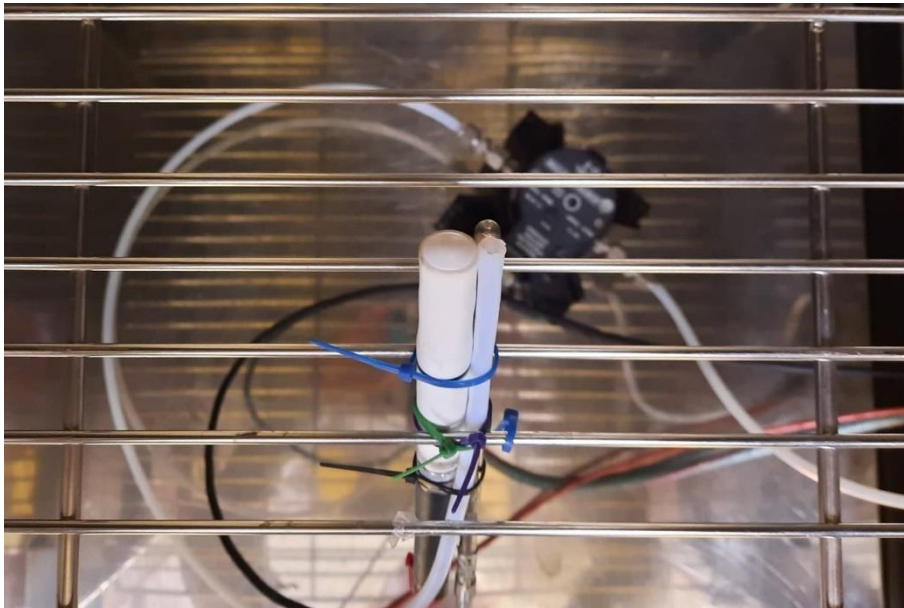
3.2. Metoda usporedbenog umjeravanja

Ova metoda umjeravanja podrazumijeva usporedbu očitavanja umjeravanog i etalonskog instrumenta, pri čemu su njihovi osjetnici postavljeni u istu komoru s kondicioniranim zrakom (Slika 13). Pri ovom procesu umjeravanja koristi se termo-higrostatirana komora u kojoj se postiže željeno stanje zraka, tj. njegova temperatura i relativna vlažnost. U unutrašnjost te komore postavlja se osjetnik umjeravanog higrometra, etalonski termometar te etalonski osjetnik rosišta. U neposrednu blizinu osjetnika umjeravanog higrometra postavljaju se platinski otpornički osjetnik temperature te cjevčica etalonskog higrometra za uzorkovanje zraka. Sve tri navedene komponente postavljaju se na istu visinu (Slika 14) tako da mjere stanje zraka na istom mjestu. Etalonski higrometar funkcionira na principu strujanja zraka preko hladnog ogledala te u trenutku kada se na njemu počne stvarati kondenzat zrak je postigao svoju temperaturu rošenja. Nakon prestrujavanja zraka preko ogledala, on se cjevčicom odvodi iz komore gdje prolazi kroz rotametar te pumpu (Slika 15) koja zapravo izvlači zrak iz klimatizirane komore. Rotametar služi za regulaciju protoka zraka kroz etalonski osjetnik rosišta. Cijev koja izlazi iz komore je napravljena od teflona te je poželjno da bude što kraća kako bi što manjom površinom bila u dodiru s vanjskim okolišem. Na mjestima gdje je izlazna cijev u dodiru s okolnim zrakom može doći do kondenziranja zraka unutar cijevi ukoliko je temperatura rošenja viša od temperature zraka u

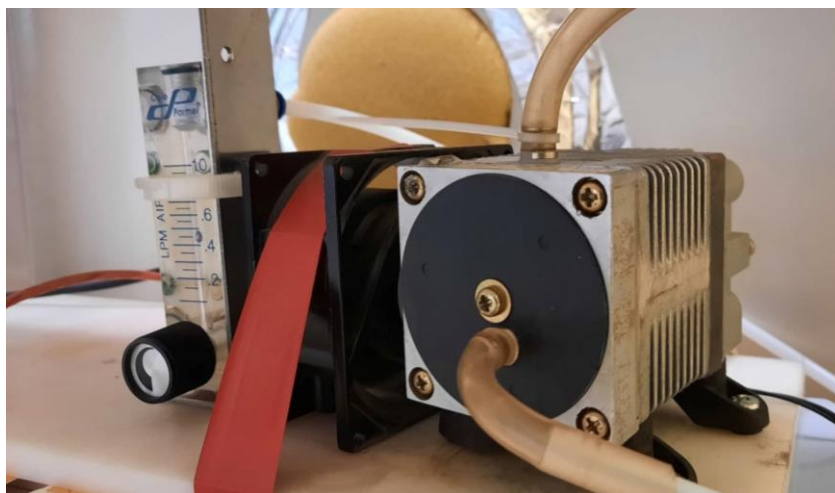
prostoriji. Ukoliko dođe do kondenziranja zraka u cijevi protok će se smanjiti s prvotnih 0,5 l/min, ali dok god postoji neki protok mjerenje je pod kontrolom. Također, ako dođe do pojave vode u pumpi javlja se neugodan zvuk, što nikako nije dobro za pumpu. Kako bi se sve to spriječilo potrebno je izlaznu cijev toplinski izolirati i/ili grijati. Moguće je ju grijati grijačem koji se omota oko nje (Slika 16), fenom i sl. Temperatura na koju grijač zagrijava cijevi regulira se posebnim regulatorom tog grijača, a temperatura cijevi prati se termoparom koji služi kao kontrolni termometar. Potrebno je temperaturu cijevi uvijek održavati na temperaturi iznad rosišta zraka koji struji unutar nje. Izvan komore nalaze se i pokazne jedinice etalonskih mjerila te pokazna jedinica umjeravanog higrometra. Rezultati mjerenja prate se i spremaju na računalu. Rezultate mjerenja koje daje umjeravani instrument uspoređuju se s rezultatima koje daju etalonski termometar i higrometar, koji su umjereni metodom usporedbe, tako da je poznato njihovo odstupanje. Etalonski higrometar točke rose umjeren je pomoću primarnog generatora. Na kraju mjerenja, rezultate koji su dobiveni etalonskim instrumentima potrebno je korigirati kako bi se došlo do referentnih vrijednosti. Ova metoda jednostavnija je od metode s direktnim korištenjem primarnog generatora, koja se koristi samo za najpreciznija mjerenja. Zbog tehničkih ograničenja termo-higrostatirane komore umjeravanje ovom metodom nije bilo moguće u svim umjernim točkama pa se za rosišta niža od 5 °C morao koristiti primarni generator točke rose.



Slika 13. Shema mjerne linije za usporedbeno umjeravanje mjerila relativne vlažnosti zraka



Slika 14. Položaj umjeravanog instrumenta, etalonskog termometra i cjevčice za uzorkovanje unutar komore



Slika 15. Rotametar i pumpa



Slika 16. Izlazna cijev omotana grijačem

3.2.1. Higrometar točke rose s hlađenim ogledalom

Rad higrometra s rashlađenim zrcalom (Slika 17) temelji se na održavanju nultog prijenosa neto mase između kondenzirane faze i parne faze vode i određivanju temperature kondenzirane faze. Kondenzirani sloj se inicijalno formira hlađenjem površine ogledala ispod temperature rošenja uzorka plina. Sloj se može sastojati od kapljica vode ili kristala leda, ali uglavnom se početni kondenzat sastoji od kapljica (ponekad do $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$). U području ispod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ dolazi do faznih prijelaza između krute i tekuće faze te također unutar krute faze (promjene površinske energije) što značajno utječe na očitavanje higrometra. Iako se u higrometru u stabilnoj situaciji može postići gotovo nulti neto prijenos mase molekula vode, postoji značajan prijenos topline preko granice faza (tj. površine kondenziranog sloja). Sve vrste mehanizama prijenosa topline (provođenje, konvekcija i zračenje) između zrcala, kondenziranog sloja, plina i njihove okoline utječu na mjerenja. Zbog faznih prijelaza i neravnotežnog stanja na zrcalu, neiskusni mjeritelji često prilikom istog mjerenja postižu rezultate različite kvalitete. S druge strane, iskusan mjeritelj može postići s najboljim raspoloživim instrumentima ponovljive rezultate s niskom nesigurnošću. Higrometri točke rose nisu jednostavni mjerni instrumenti. Rosište se određuje rashladnim sustavom u kombinaciji sa sustavom za promatranje pojave kondenzata. U modernim higrometrima točke rose obično postoji kontrolni sustav za stabilizaciju sloja kondenzata na glatkoj i čistoj metalnoj površini. Temperatura rošenja mjeri se osjetnikom temperature fiksiranim što je bliže moguće sloju kondenzata (točka ravnoteže). Za mjerenje temperature ogledala obično se koristi minijaturni platinski otpornički osjetnik. [1]



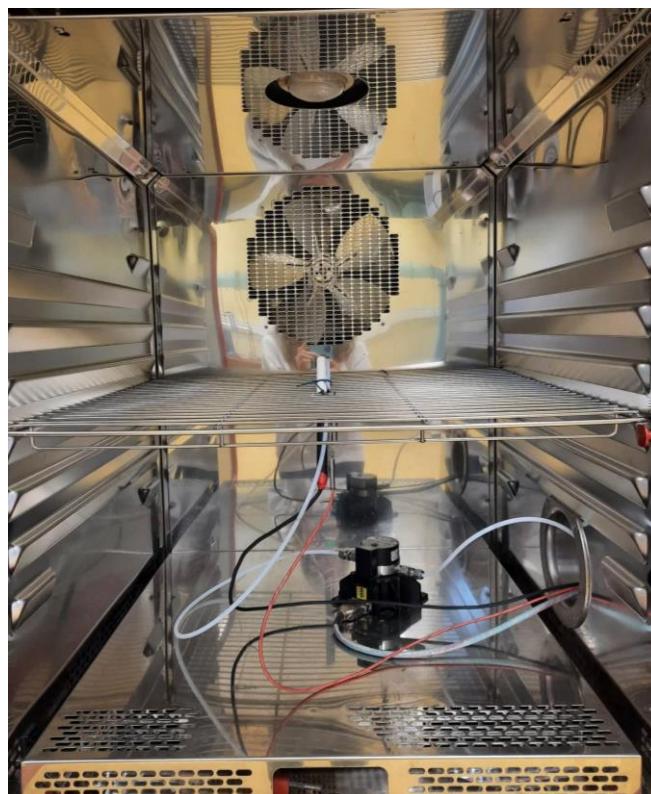
Slika 17. Etalonski higrometar točke rose

3.2.2. Termo-higrostatirana komora

U okviru izrade diplomskog rada korištena je termo-higrostatirana komora proizvođača *Vötsch Industrietechnik*, model VC 0033. Ona služi za generiranje zraka željenih vrijednosti temperature i relativne vlažnosti, koje se postavljaju pomoću regulatora komore (Slika 18). U komori se nalazi kadica s vodom koja se hladi/grije na potrebnu temperaturu rošenja, a koristi se demineralizirana voda kako ne bi došlo do nakupljanja kamenca. Spremnik vode ima dvije pumpe pomoću kojih se ostvaruje cirkulacija vode jer zasićivanje zraka ide brže ukoliko površina vode nije mirna. U kadici s vodom nalazi se plovak koji daje informaciju o razini vode. Komora je također opremljena s rashladnim uređajem s freonom. Rashladni uređaj se koristi za dva rashladna sustava, jedan za zrak i jedan za vodu kojom se zasićuje zrak. U samoj unutrašnjosti komore cirkulacija zraka ostvaruje se pomoću ventilatora koji se vidi na stražnjoj stijenci (Slika 19). Tlak koji vlada u unutrašnjosti komore je blizu atmosferskog tlaka.



Slika 18. Regulator temperature i relativne vlažnosti zraka u komori



Slika 19. Unutrašnjost komore

3.2.3. Pokazni instrument etalonskih mjerila

Pokazni instrument proizvođača GE (*General Eastern*) (Slika 20) koristi se za prikaz trenutnog stanja zraka u termo-higrostatiranoj komori. Na ekranu instrumenta vidi se trenutna vrijednost relativne vlažnosti i temperature zraka. Osim toga moguće je pratiti i količinu kondenzata koji se stvara na zrcalu etalonskog higrometra. Stanje zrcala varira od suhog do potpuno vlažnog. Sloj kondenzata na zrcalu raste kako se radi o zraku s višom relativnom vlažnosti.



Slika 20. Pokazni instrument higrometra točke rose

Osim pomoću pokazne jedinice, rezultati mjerenja prate se i snimaju na računalo pomoću računalnog programa „*GE logger*“. Na njemu su prikazane temperatura rošenja, temperatura i relativna vlažnost zraka. Referentna vrijednost relativne vlažnosti zraka dobiva se tek nakon korekcija očitavanja, u skladu s informacijama iz potvrde o umjeravanju etalonskog higrometra, te se ta vrijednost koristi dalje pri uspoređivanju s rezultatima mjerenja dobivenim umjeranim instrumentom.

4. PROCJENA MJERNE NESIGURNOSTI

Kod predstavljanja rezultata mjerenja, predstavlja se zapravo njegova procjena i pretpostavka njegove kvalitete. Ukoliko nije dana procjena nesigurnosti, korisnik mjerenja nema saznanja o parametrima koji utječu na rezultate mjerenja. Zaključak o kvaliteti je u tom slučaju moguće donijeti samo na temelju rezolucije korištenog instrumenta, što je često pogrešno. Ako se radi o iskusnom mjeritelju, tada se on koristi svojim znanjem kada je u pitanju kvaliteta mjerenja. No i u tom slučaju zaključci se temelje na nagađanju bez uvida u stvarno stanje. Osobito kod mjerenja vlažnosti, stvarna nesigurnost je tipično nekoliko desetaka puta veća od one očekivane od strane neiskusnog mjeritelja. Rezultati mjerenja mogu biti prezentirani samo ako su mjerenja analizirana te je procijenjena pripadna mjerna nesigurnost, a dubina analize ovisi o ciljanoj razini nesigurnosti. Iako, potrebno je imati na umu da svi parametri koji utječu na mjerenje nikad nisu poznati. No upravo iz tog razloga potrebno je identificirati i kvantificirati parametre koji značajno doprinose nesigurnosti rezultata, u odnosu na ciljanu razinu nesigurnosti. [1]

4.1. Mjerna nesigurnost – osnove

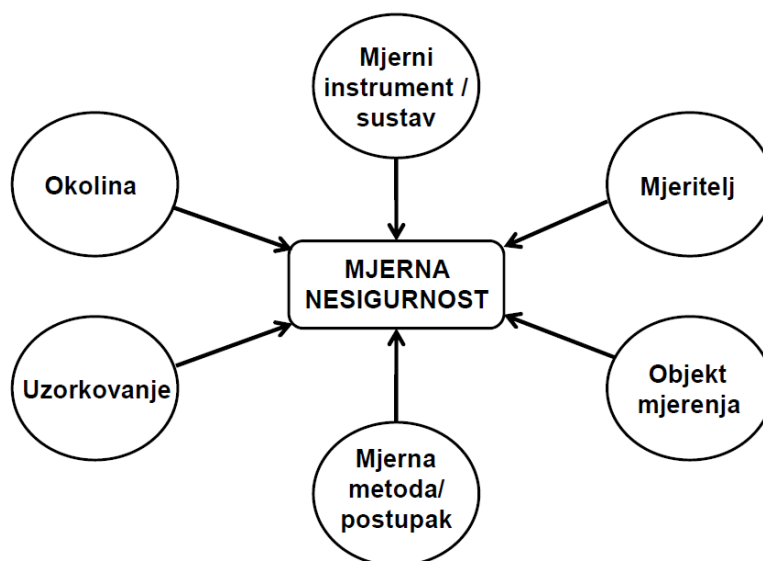
Po završetku svakog mjerenja potrebno je dobivene rezultate obraditi. Niti jedno mjerenje nije potpuno bez procjene kvalitete rezultata. Nije svako mjerenje dovoljno kvalitetno kako bi se njegovim rezultatima kasnije moglo služiti. Jedan od parametara za procjenu kvalitete rezultata mjerenja je procjena mjerne nesigurnosti. Stroga definicija mjerne nesigurnosti: parametar povezan s rezultatom mjerenja, tj. parametar koji karakterizira disperziju vrijednosti koje bi se razumno mogle pripisati mjernoj veličini. Pojednostavljena definicija: kvantificirana sumnja u mjerni rezultat. Pod mjernom nesigurnosti se ne smatraju greške, tolerancije, točnost tj. netočnost te statistička analiza koja nije isto što i analiza nesigurnosti.

Činjenice o mjernoj nesigurnosti:

- svako mjerenje je podložno određenoj nesigurnosti,
- mjerni rezultat je nepotpun bez izjave o nesigurnosti,
- kada je nesigurnost mjerenja poznata, tada je moguće procijeniti njegovu prikladnost za svrhu,
- razumijevanje mjerne nesigurnosti je prvi korak za njeno smanjenje.

Važno je ne miješati pojmove pogreške i nesigurnosti. Pogreška je razlika između izmjerene vrijednosti i „prave“ vrijednosti. Nesigurnost je kvantifikacija sumnje u rezultat mjerenja. U biti,

greške se mogu prepoznati i ispraviti, ali svaka greška čija vrijednost nije poznata je izvor nesigurnosti. Budući da nikad nije poznata stvarna vrijednost pogreške ili bilo kojeg drugog parametra koji utječe na rezultat mjerenja, svi oni imaju nesigurnosti koje doprinose kombiniranoj nesigurnosti. [1] Postupak procjene mjerne nesigurnosti bit će detaljno opisan u sljedećim poglavljima. Bez podatka o mjernoj nesigurnosti rezultat mjerenja nije potpun. Samo mjerenje je zapravo proces eksperimentalnog određivanja vrijednosti mjerene veličine, u ovom slučaju vrijednosti relativne vlažnosti i temperature, no te vrijednosti nije moguće savršeno točno odrediti. Također, ni vrijednosti koje daju referentni instrumenti nisu nikad u potpunosti točne već su i one samo procjena te ih se naziva referentnim vrijednostima. Na temelju vrijednosti izmjerenih umjeravanim instrumentom i referentnih vrijednosti, te utjecajnih parametara na rezultate mjerenja dobiva se konačni rezultat umjeravanja. On mora sadržavati referentnu vrijednost, vrijednost koju daje umjeravani instrument, eventualno odstupanje umjeravanog instrumenta do referentnog te na kraju proširenu mjernu nesigurnost. U slučaju mjerenja relativne vlažnosti, nesigurnost se iskazuje u postocima relativne vlažnosti. Svako mjerenje sa sobom nosi neke izvore mjerne nesigurnosti (Slika 21) koji daju doprinos ukupnoj mjernoj nesigurnosti. U slučaju mjerenja relativne vlažnosti javljaju se utjecaji na mjernu nesigurnost zbog umjeravanja, histereze, rezolucije instrumenta itd. Detaljno će biti opisani u sljedećem poglavlju. Sama bit procjene mjerne nesigurnosti je promatranje utjecaja pojedinih faktora. Ukoliko neki faktori vrlo malo utječu na rezultat i moguće ih je zanemariti, to je poželjno jer onda nije potrebno promatrati velik broj parametara nego samo one najutjecajnije budući da oni i najviše utječu na konačnu mjernu nesigurnost. Na ukupnu nesigurnost umjeravanja utječu i referentni i umjeravani instrument. No i nakon svih korekcija rezultat mjerenja je i dalje samo procjena mjerene veličine zbog nesavršenosti korekcija i zbog slučajnih čimbenika. Rezultat mjerenja, nakon provedenih korekcija, može biti vrlo blizu stvarnoj vrijednosti mjerene veličine iako mu je dodijeljena velika mjerna nesigurnost. Mjernu nesigurnost ne treba izjednačavati s mjernom pogreškom, jer nesigurnost nam samo govori o samoj kvaliteti provedenog mjerenja. Postoje dva načina procjene mjerne nesigurnosti: tip A i tip B.



Slika 21. Izvori mjerne nesigurnosti

4.1.1. Procjena mjerne nesigurnosti tipa A

Mjerna nesigurnost se u ovom slučaju dobiva statističkom analizom rezultata dobivenih iz ponavljanih mjerenja kao što je slučaj u ovom radu. Prema procjeni mjerne nesigurnosti tipa A iz prosjeka rezultata se dobije srednja vrijednost i rasipanje rezultata te se na temelju toga procjeni statistička raspodjela rezultata. Ako se radi o većem broju mjerenja tada se uzima normalna raspodjela rezultata, dok se za manji broj mjerenja primjenjuje t-raspodjela.

4.1.2. Procjena mjerne nesigurnosti tipa B

Ukoliko se mjerna nesigurnost dobiva na ostale načine, osim onog navedenog pod tipom A, tada se radi o procjeni mjerne nesigurnosti tipa B. Ne koriste se rezultati iz ponavljanih mjerenja nego se mjerna nesigurnost procjenjuje iz tehničkih specifikacija i ostalih dostupnih podataka o mjernoj opremi, iz potvrde o umjeravanju, iz iskustva i znanja mjeritelja itd. Nesigurnosti ovog tipa najčešće se prikazuju s pravokutnom raspodjelom, no mogu se javljati i ostale statističke raspodjele.

4.1.3. Standardna i proširena mjerna nesigurnost

Konačni rezultat procjene mjerne nesigurnosti prikazuje se u obliku proširene mjerne nesigurnosti. Ona predstavlja interval vrijednosti oko srednje vrijednosti mjerenih rezultata za koji se može očekivati da obuhvaća velik dio razdiobe vrijednosti koje bi se mogle pripisati mjerenoj veličini. Vrijednost proširene mjerne nesigurnosti U dobije se množenjem standardne mjerne nesigurnosti u s faktorom proširenja k :

$$U = u \cdot k \quad (1)$$

Kod izražavanja mjerne nesigurnosti na željenoj razini pouzdanosti, treba se raditi sa standardnim nesigurnostima te ih množiti do željene vrijednosti faktora pokrivenosti k . Ako kombinirana nesigurnost ima „mnogo stupnjeva slobode“ tj. ako se temelji na mnogim mjerenjima tada vrijede ove aproksimacije za vrijednosti k :

- $k = 1$ za razinu pouzdanosti od približno 68 %,
- $k = 2$ za razinu pouzdanosti od približno 95 %,
- $k = 3$ za razinu pouzdanosti od približno 99,7 %.

U mjeriteljstvu je uobičajeno koristiti faktor pokrivenosti $k=2$ koji daje razinu pouzdanosti od 95 %. Proširena nesigurnost je ono što je na kraju potrebno prikazati u sklopu rezultata mjerenja i umjeravanja. Za opisivanje rezultata potrebno je zapisati procjenu i nesigurnost mjernog rezultata, a nesigurnost se izražava u smislu faktora pokrivenosti zajedno s veličinom intervala nesigurnosti te se navodi razina pouzdanosti. [1]

Standardna nesigurnost se računa kao korijen sume kvadrata standardnih nesigurnosti svih izvora nesigurnosti mjerenja. Svaki od utjecajnih faktora zajedno djeluju na mjernu nesigurnost. Općenito se rezultat mjerenja prikazuje kao izmjerena vrijednost i proširena mjerna nesigurnost.

$$q_{izm} \pm U(q_{izm}) \quad (2)$$

Faktor pokrivanja k , s kojim se množi standardna nesigurnost da bi se došlo do proširene, ovisi o razdiobi vjerojatnosti svake ulazne veličine. Različiti su koeficijenti za normalnu i pravokutnu razdiobu. Obično se uz proširenu mjernu nesigurnost priloži i razina pouzdanosti p , koji govori o tome s kojom se vjerojatnošću izmjerena veličina nalazi u navedenom intervalu.

4.2. Utjecajni parametri

Tijekom svakog mjerenja postoje određeni utjecajni parametri koji utječu na mjernu nesigurnost te kvalitetu mjerenja. U ovom slučaju radi se o mjerenju relativne vlažnosti zraka pa će unutar ovog poglavlja biti objašnjeni utjecajni parametri koji se javljaju pri tom tipu mjerenja. Proširena nesigurnost umjeravanja mjerila relativne vlažnosti računa se pomoću tablice (Slika 22) koja se naziva budžet nesigurnosti. Prvi dio te tablice odnosi se na referentni instrument i zonu kontrolirane vlažnosti i temperature (komoru) dok se njezin drugi dio odnosi na umjeravani instrument, budući da oba utječu na mjernu nesigurnost. Prvi od faktora koji utječu na rezultat mjerenja je nesigurnost umjeravanja referentnog instrumenta koja u ovom slučaju iznosi $0.035\text{ }^{\circ}\text{C}$. Neki od ostalih faktora su nesigurnost zbog klizanja (engl. *drift*), stabilnosti, rezolucije (razlučivosti) očitavanja, histereze, nesigurnost zbog standardne devijacije očitavanja točke rose itd. Za navedene utjecajne parametre zapravo nije poznata vrijednost korekcije nego samo nesigurnost koja se javlja zbog tih parametara. Ukoliko bi bila poznata vrijednost korekcije kod klizanja, to bi bilo upisano u stupac *Value*, ali jednakovrijedno je i uzimanje nesigurnosti zbog klizanja (engl. *uncertainty*). Na taj način ne zna se koliko je točno korekcija, ali se uzima područje u kojem se može pojaviti korekcija zbog klizanja te se na temelju njega izračuna nesigurnost. Vrijednost klizanja bi se mogla odrediti nakon nekoliko perioda umjeravanja kada je vidljivo koliko se svaki put promijenilo odstupanje instrumenta u istoj umjernoj točki te se na temelju toga procjenjuje iznos klizanja.

Procjena nesigurnosti koja se odnosi na pad tlaka uključuje doprinose zbog varijacije tijekom vremena te zbog toga što se ne primjenjuje korekcija na referentnu vrijednost temperature rošenja. Kad se provodi analiza nesigurnosti za generator točke rose, zapravo se uspostavljaju granice vjerojatnosti za razliku od idealnog generatora. [1] Na neke od faktora koji određuju mjernu nesigurnost mjerenja moguće je utjecati, dok na neke ne. Na sami umjeravani instrument nije moguće utjecati, njegovo stanje je onakvo u kakvom je došao u laboratorij na umjeravanje. Za njega je potrebno izračunati ponovljivost i histerezu, budući da su to faktori koji najviše utječu na nesigurnost mjerenja. Postupci računanja tih vrijednosti bit će opisani u jednom od sljedećih poglavlja.

Quantity	Symbol	Value	Uncertainty	Probability	Sensitivity coeff.	Contribution [%rh]
Dew point (reference)	td	43.47 °C				
Calibration	$u(t_{d\text{ cal}})$	0.12 °C	0.035	normal	3.68005954	0.13
Drift	$u(t_{d\text{ drift}})$	0 °C	0.04	rectangular	3.68005954	0.09
Stability	$u(t_{d\text{ stab}})$	0 °C	0.01	rectangular	3.68005954	0.02
Resolution	$u(t_{d\text{ res}})$	0 °C	0.01	rectangular	3.68005954	0.01
Hysteresis	$u(t_{d\text{ hys}})$	0 °C	0	normal	3.68005954	0
t_d measured	$u(t_d)$	0 °C	0.009154988	normal	3.68005954	0.03
Test temperature	t	50.087 °C	0.08		3.505181556	0.30
Saturation pressure	p_s	1013.00	0.53		0.069555195	0.04
Test pressure	p	1012.93	0.53		0.069554315	0.04
Vapour pressure	e_s	88.68	0.00	rectangular	0.007995313	2E-05
Vapour pressure	e	124.06	0.00	rectangular	0.005650838	2E-05
Enhancement factor	f_s	1.0049	0.0001	rectangular	70.31118672	0
Enhancement factor	f	1.0052	0.0000	rectangular	69.94649531	0
DUT	h_{DUT}	72.38 %rh				
RH measured	$u(h_{\text{DUT meas}})$	0	0.048754377	normal	1	0.05
Resolution	$u(h_{\text{DUT res}})$	0	0.01	rectangular	1	0.01
Repeatability	$u(h_{\text{DUT rep}})$	0	0.77	rectangular	1	0.44
Hysteresis	$u(h_{\text{DUT hys}})$	0	0.4	rectangular	1	0.23
Reference RH	h	71.448 %rh				0.61
Expanded uncertainty (k=2)					U=	1.21

Slika 22. Primjer budžeta nesigurnosti za umjeravanje mjerila relativne vlažnosti

U budžetu nesigurnosti za umjeravanje mjerila relativne vlažnosti (Slika 22) svaki red tablice odgovara jednom utjecajnom parametru osim posljednja dva retka, koja pokazuju vrijednosti standardne i proširene nesigurnosti umjeravanja. Utjecajni parametri su redom: nesigurnost umjeravanja referentnog instrumenta, klizanje, stabilnost, rezolucija očitavanja, histereza te nesigurnost zbog očitavanja izmjerene temperature rošenja; nesigurnost uzrokovana mjerenjem tlaka zraka u saturatoru p_s i tlaka zraka u umjernoj komori p te određivanjem tlakova zasićenja vodene pare e , nesigurnosti faktora povećanja tlaka zasićenja u prisutnosti nekondenzirajućih plinova f ; nesigurnost zbog standardne devijacije očitavanja relativne vlažnosti izmjerene umjeranim instrumentom, rezolucija umjeranog instrumenta, ponovljivost umjeranog instrumenta te nesigurnost zbog histereze umjeranog instrumenta. Osim vrijednosti i pripadne procjene mjerne nesigurnosti svakog parametra, u tablici se nalaze i podaci o distribuciji vjerojatnosti (pravokutna ili normalna distribucija), koeficijenti osjetljivosti te doprinos kombiniranoj nesigurnosti koji predstavlja umnožak standardne nesigurnosti ulazne veličine i koeficijenta osjetljivosti.

Osim proširene mjerne nesigurnosti relativne vlažnosti, pri mjerenju u ovom radu, računa se i proširena nesigurnost umjeravanja mjerila temperature ugrađenog u umjeravani higro-termometar, budući da je i ona relevantna pri iznošenju rezultata ovog procesa umjeravanja. Proširena mjerna nesigurnost također se računa pomoću budžeta nesigurnosti (Slika 23). Kao i kod relativne vlažnosti, prvi dio budžeta nesigurnosti odnosi se na referentni instrument i zonu u kojoj se on umjerava, dok se njezin drugi dio odnosi na umjeravani instrument. Utjecajni faktori na rezultat pri mjerenju temperature navedeni su u budžetu. Za neke od njih poznata je sama vrijednost korekcije, a za sve faktore navedena je nesigurnost, što je jednakovrijedno. Pri određivanju proširene nesigurnosti umjeravanja mjerila temperature, kao i kod relativne vlažnosti, utjecajni parametri su ponovljivost i rezolucija umjeravanog instrumenta.

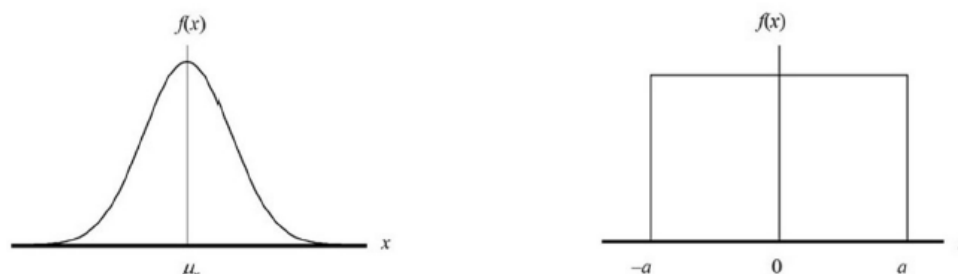
Quantity	Symbol	Value	Uncertainty	Probability	Sensitivity coeff.	Contribution [°C]
Test temperature (reference)	t	50.19 °C				
Thermo. cal. uncertainty (sensor and ind. unit)	$u(t_{\text{Thermo cal}})$	-0.09	0.025	normal	1	0.01
Thermo. self heating (sensor)	$u(t_{\text{Thermo self heat}})$	-0.01	0.01	rectangular	1	0.01
Thermo. long term stab.	$u(t_{\text{Thermo stab}})$	0	0.03	rectangular	1	0.02
Thermo. resolution (ind. unit)	$u(t_{\text{Thermo res}})$	0	0.01	rectangular	1	0.01
Test chamber homogeneity	$u(t_{\text{Test chamber hom}})$	0	0.14	normal (2σ)	1	0.07
Indicated temperature	$u(t)$	0	0.008004	rectangular	1	0
DUT	t_{DUT}	50.21 °C				
Indicated temperature	$u(t_{\text{DUT}})$	0	0.00886	rectangular	1	0.01
Repeatability	$u(t_{\text{DUT rep}})$	0	0	rectangular	1	0
Resolution	$u(h_{\text{DUT res}})$	0	0.01	rectangular	1	0
Reference	t	50.09 °C				0.07
Expanded uncertainty (k=2)					U=	0.15

Slika 23. Primjer budžeta nesigurnosti za umjeravanje mjerila temperature

Svaka od opisanih nesigurnosti javlja se s određenom vjerojatnošću koja je određena razdiobom. Razdiobe koje se najčešće javljaju su normalna i pravokutna (Slika 24). Nesigurnost zbog klizanja ponaša se po pravokutnoj razdiobi, što znači da je podjednako vjerojatno da će se klizanje nalaziti između vrijednosti koje omeđuju interval, u ovom slučaju između +0,03 i -0,03 °C. Unutar tog intervala nalazi se vrijednost nesigurnosti u stvarnom trenutku mjerenja, a jednaka je vjerojatnost da ona bude bilo koja vrijednost unutar tog intervala. Razdioba uvijek govori o vjerojatnosti javljanja nekog rezultata mjerenja. Kod normalne ili Gaussove razdiobe najveća je vjerojatnost da će mjerena veličina biti u blizini srednje vrijednosti očitavanja. Cilj procjene mjerne nesigurnosti je

sve utjecajne parametre svesti na normalnu razdiobu te konačni rezultat prikazati u takvom obliku.

Za parametre koji se ponašaju prema pravokutnoj razdiobi potrebno je napraviti dijeljenje s korijenom iz 3 kako bi bili svedeni na nesigurnost po normalnoj razdiobi.



Slika 24. Normalna i pravokutna razdioba

Standardna mjerna nesigurnost prema normalnoj razdiobi izražava se kao omjer proširene mjerne nesigurnosti i faktora prekrivanja k :

$$u(x) = \frac{U(x)}{k} \quad (3)$$

dok se mjerna nesigurnost prema pravokutnoj razdiobi dobiva dijeljenjem poluintervalu a s korijenom iz 3:

$$u(x) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

4.2.1. Koeficijenti osjetljivosti

Opisani utjecajni parametri unose se u budžet nesigurnosti u jedinicama temperature, no ukoliko se radi o računanju mjerne nesigurnosti za mjerenje relativne vlažnosti potrebno ih je na kraju izraziti u postocima relativne vlažnosti. Kako bi se izrazili u postocima relativne vlažnosti potrebno ih je množiti s odgovarajućim koeficijentom osjetljivosti. Koeficijenti osjetljivosti, u prvom dijelu tablice budžeta nesigurnosti, govore o tome koliko se relativna vlažnost mijenja s promjenom temperature rošnja. U biti su oni, općenito, dobiveni parcijalnim deriviranjem mjerne veličine po veličini preko koje se posredno mjeri. Za utjecajne parametre koji su navedeni u prvom dijelu tablice (Slika 22) poput umjeravanja, klizanja, stabilnosti itd. potrebno je poznavati koeficijent osjetljivosti za temperaturu rošnja mjerenu referentnim instrumentom. Za ostale

utjecajne faktore potrebno je poznavati i ostale koeficijente osjetljivosti. Neki od njih navedeni su u nastavku [4].

Koeficijent osjetljivosti za temperaturu rošenja mjerenu referentnim instrumentom je:

$$C_{td} = \frac{\partial h}{\partial t_d} = \frac{[(f'_s \cdot e_s \cdot p + f_s \cdot e'_s \cdot p) \cdot (f \cdot e \cdot p_s) - (f_s \cdot e_s \cdot p) \cdot (f' \cdot e \cdot p_s)]}{(f \cdot e \cdot p_s)^2} \quad (5)$$

Koeficijent osjetljivosti za temperaturu zraka mjerenu etalonskim otporniĉkim termometrom je:

$$C_t = \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{[-(f_s \cdot e_s \cdot p) \cdot (f' \cdot e \cdot p_s + f \cdot e' \cdot p_s)]}{(f \cdot e \cdot p_s)^2} \quad (6)$$

Koeficijent osjetljivosti za tlak zasićenja je:

$$C_{ps} = \frac{\partial h}{\partial p_s} = \frac{[(f'_s \cdot e_s \cdot p) \cdot (f \cdot e \cdot p_s) - (f_s \cdot e_s \cdot p) \cdot (f \cdot e)]}{(f \cdot e \cdot p_s)^2} \quad (7)$$

Koeficijent osjetljivosti za ispitni tlak je:

$$C_p = \frac{\partial h}{\partial p} = \frac{[(f_s \cdot e_s \cdot f \cdot e \cdot p_s) - (f_s \cdot e_s \cdot p) \cdot (f' \cdot e \cdot p_s)]}{(f \cdot e \cdot p_s)^2} \quad (8)$$

4.3. Postupak procjene mjerne nesigurnosti – metoda usporedbenog umjeravanja

Izvori nesigurnosti kod metode usporedbenog umjeravanja:

- generiranje vlažnog zraka,
- nesigurnost referentnog standarda/etalona,
- sami umjeravani instrument,
- metoda umjeravanja i uvjeti okoline.

Referentna vrijednost kod metode usporedbenog umjeravanja mjeri se umjerenim osjetnikom rosišta. Glavni izvori nesigurnosti zbog kojih je potrebno korigirati izmjerenu vrijednost kako bi se dobila referentna su:

-
- nestabilnost vlage u generiranom uzorku zraka,
 - nehomogenost vlažnosti zraka u radnom volumenu termo-higrostatirane komore,
 - razlika tlaka između referentnog i umjeravanog instrumenta.

Obično se standardne nesigurnosti kod mjerenja relativne vlažnosti zbog nehomogenosti temperature kreću od 0,1 % do nekoliko % relativne vlažnosti. Nehomogenost se može smanjiti korištenjem prostora manjeg volumena za umjeravanje.

Nesigurnost referentnog etalona, naravno, ovisi o vrsti korištenog etalona. Općenito, treba odrediti sljedeće doprinose nesigurnosti:

- nestabilnost očitavanja referentnog etalona,
- nesigurnost preuzeta iz potvrde o umjeravanju,
- drift referentnog etalona,
- razlučivost,
- nesigurnost izračuna relativne vlažnosti iz temperature i temperature rošenja zraka,
- nesigurnost mjerenja električnih veličina (most, multimeter, itd.).

Nesigurnost očitavanja umjeravanog instrumenta ovisi o njegovoj vrsti. Općenito, treba odrediti sljedeće doprinose nesigurnosti:

- nestabilnost očitavanja instrumenta,
- razlučivost,
- histereza,
- utjecaj instrumenta na okolinu umjeravanja (samozagrijavanje, ovlaživanje i sl.),
- nesigurnost mjerenja električnih veličina,

Sljedivost do primarnog etalona vlažnosti ostvaruje se umjeravanjem sekundarnog etalona u nacionalnom umjernom laboratoriju. Obično se veza sljedivosti formira u smislu temperature rošenja jer su higrometri s rashlađenim zrcalom jedni od najstabilnijih instrumenata (dugoročno) dostupnih za mjerenja vlažnosti u širokom mjernom rasponu. Sekundarni sustavi za umjeravanje također se koriste za rutinska umjeravanja u većini laboratorija koji održavaju i primarne etalone. Instrumenti se uvelike razlikuju u laboratorijima koji koriste sekundarne etalone. Neki laboratoriji koriste opremu sličnu primarnim etalonskim generatorima za formiranje kontroliranog okoliša (ili uzorka plina kontrolirane vlažnosti). Mnogi laboratoriji koriste klimatizirane komore prvotno dizajnirane za industrijske primjene. U upotrebi su i druge vrste mjernih sustava. Mjerenja temperature i tlaka provode se pomoću raznih instrumenata. Unatoč raznolikosti instrumentacije, principi i glavne komponente u procjeni nesigurnosti su isti. [1] Za određivanje mjerne

nesigurnosti svake od točaka mjerenja korištene su Excel tablice Laboratorija za procesna mjerenja. Prvi korak pri računanju mjerne nesigurnosti je određivanje srednjih vrijednosti i standardnih devijacija očitavanja instrumenata. Za referentni instrument u Excel predložak unose se srednje vrijednosti i standardne devijacije izmjerenih temperatura i temperatura rošenja zraka, a za umjeravani instrument srednje vrijednosti i standardne devijacije relativne vlažnosti i umjerne temperature. Također, unose se i vrijednosti rezolucije umjeravanog instrumenta za mjerenje vlažnosti i temperature. U slučaju instrumenta umjeravanog u okviru ovog rada rezolucija očitavanja iznosi 0,01. Osim rezolucije potrebno je unijeti i vrijednosti histereze i ponovljivosti koje se računaju u zasebnim „Excel“ tablicama. Na temelju navedenih podataka „Excel“ u pozadini izračuna sve potrebne vrijednosti prema odgovarajućim jednadžbama [4].

Jednadžba za izračun relativne vlažnosti zraka:

$$h = \frac{f(p_s, t_s) \cdot e(t_s)}{f(p, t) \cdot e(t)} \cdot \frac{p}{p_s} \quad (9)$$

Jednadžba za izračun relativne vlažnosti zraka uz pretpostavku $f(p_s, t_s) = f(p, t)$

$$h = \frac{e(t_s)}{e(t)} \cdot \frac{p}{p_s} \quad (10)$$

Tlak zasićenja kao funkcija temperature zraka aproksimiran Sonntagovom formulom:

$$e_w(t) = \exp(6096,9385 \cdot (273,15 + t)^{-1} + 16,635794 - 2,711193 \cdot 10^{-2} \cdot (273,15 + t) + 1,673952 \cdot 10^{-5} \cdot (273,15 + t)^2 + 2,433502 \cdot \ln(273,15 + t)) \quad (11)$$

Faktor uvećanja koji se koristi za korekciju parcijalnog tlaka dobivenog Daltonovim zakonom aproksimira se Bögelovom formulom:

$$f_w(p, t) = 1 + \frac{10^{-4} e_w(t)}{273,15 + t} \cdot \left(38 + 173 \cdot e^{-\frac{t}{43}}\right) \cdot \left(1 - \frac{e_w(t)}{p}\right) + (6,39 + 4,28 \cdot e^{-\frac{t}{107}}) \cdot \left(\frac{p}{e_w} - 1\right) \quad (12)$$

Tlak zasićenja pri tlaku i temperaturi rošenja:

$$e' = f_w(p_s, t_d) \cdot e_w(t) \quad (13)$$

Tlak zasićenja pri umjernom tlaku i temperaturi:

$$e'_w(t) = f_w(p, t) \cdot e_w(t) \quad (14)$$

Relativna vlažnost:

$$h = \frac{e'}{e'_w} \quad (15)$$

Rezultat provedenog postupka su referentne vrijednosti temperature i relativne vlažnosti zraka izmjerene referentnim instrumentom. Pod referentne vrijednosti se podrazumijeva da su provedene odgovarajuće korekcije rezultata dobivenih mjerenjem. Upravo s tim referentnim vrijednostima uspoređuju se vrijednosti dobivene umjeravanjem instrumentom te se na temelju njih određuju standardna i proširena mjerna nesigurnost. Na kraju procesa umjeravanja se uz svaku točku mjerenja iskazuje pripadajuća mjerna nesigurnost kako bi vlasnik umjeravanog instrumenta imao uvid u njegove mjerne karakteristike i kako bi znao provesti potrebne korekcije. Instrumenti u nekim umjernim točkama bolje rade (imaju manju mjernu nesigurnost), a u nekim točkama rade manje precizno pa imaju veću mjernu nesigurnost te se u tim područjima možda neće ni koristiti. Obično s porastom relativne vlažnosti raste mjerna nesigurnost. Također, umjeravanjem nikad nisu pokrivena sve vrijednosti relativne vlažnosti, no uvijek se može koristiti interpolacija ili prihvaćanje veće mjerne nesigurnosti što je uvijek na strani sigurnosti.

4.3.1. Histereza

Histereza je razlika u rezultatima mjerenja pri uzlaznoj i silaznoj putanji mjerenja. Obično se određuje za neku točku mjerenja koja se nalazi u sredini mjernog raspona instrumenta. Mjerenje se za tu točku provodi dva puta, jednom pri uzlaznoj putanji temperature rošenja, a drugi put po završetku sa svim točkama mjerenja. Histereza se obično određuje samo za jednu točku mjerenja, a onda se dobivena vrijednost koristi za određivanje nesigurnosti u svim ostalim točkama. Za određivanje histereze potrebno je zabilježiti srednje vrijednosti temperature i temperature rošenja izmjerene referentnim i umjeranim instrumentom. Sve navedene vrijednosti potrebno je znati za uzlazno i silazno mjerenje. Histereza se dobije kao razlika između odstupanja umjeranog instrumenta u odnosu na etalon u uzlaznom mjerenju i odstupanja umjeranog instrumenta u odnosu na etalon u silaznom mjerenju. Računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$\delta h_{hys} = (h_{ETA,UZ} - h_{DUT,UZ}) - (h_{ETA,SIL} - h_{DUT,SIL}) \quad (16)$$

4.3.2. Ponovljivost

Utjecaj ponovljivosti na nesigurnost mjerenja računa se na sličan način kao i prethodno opisani za histerezu. Određuje se odstupanje umjeranog instrumenta od referentnog prilikom mjerenja u istoj umjernoj točki tijekom dva različita dana. Također se određuje samo za jednu točku pa se te vrijednosti koriste u svim ostalima pri računanju kombiniranih mjernih nesigurnosti. Odabire se točka koju je jednostavno i brzo za postići kako se mjerenje ne bi vremenski dodatno odužilo. Ponovljivost se računa posebno za mjerenje vlažnosti, a posebno za mjerenje temperature i ti iznosi ne moraju biti jednaki. Dok se kod histereze računa samo jedna vrijednost koja se primjenjuje na određivanje referentne vrijednosti za vlažnost. Ponovljivost se računa prema sljedećoj formuli:

$$\delta h_{rep} = (h_{ETA,1} - h_{DUT,1}) - (h_{ETA,2} - h_{DUT,2}) \quad (17)$$

4.4. Postupak procjene mjerne nesigurnosti – metoda umjeravanja pomoću primarnog generatora

Osim usporedbene metode umjeravanja, u ovom radu koristi se i metoda umjeravanja pomoću primarnog generatora. Ta metoda koristila se za prve dvije točke s obzirom na niske temperature rošenja koje termo-higrostatirana komora ne može postići. Za svaku točku potrebno je mjerenje od oko 30 minuta. Od izmjerenih vrijednosti traži se period u kojem su mjerenja najstabilnija, tj. tamo gdje je standardna devijacija očitavanja najmanja. Za ovo konkretno mjerenje, od interesa su: vrijednosti temperature i relativne vlažnosti zraka koje pokazuje umjeravani instrument, tlak u saturatoru i tlak u maloj komori gdje se nalazi umjeravani instrument te temperature u kupki i saturatoru te maloj komori. Tlak unutar saturatora potreban je za računanje referentne temperature rošenja koja se postiže u kupki, a tlak u maloj komori, gdje se nalazi umjeravano mjerilo, je potreban za korekciju referentnog rosišta s obzirom na pad tlaka od saturacijske komore do umjeravanog osjetnika. Tijekom mjerenja kao kontrolni instrument korišten je higrometar točke rose MBW. Korišten je samo kao potvrda da je traženo rosište stvarno postignuto. Temperatura rošenja je određena kao srednja temperatura 3 termometra: TEPOT20 CVD i TEPOT21 CVD koji se nalaze u kupki te WIKA LRS SAT CO koji se nalazi u samom saturatoru, a temperatura u maloj komori je određena kao srednja temperatura 2 termometra: Standardni PT100 – 385 (SN:1105SJT5) i Standardni PT100 – 385 (SN:1105SA9I). Dobivenu srednju temperaturu rošenja potrebno je korigirati i to se radi pomoću tlaka u saturatoru i tlaka u maloj komori. Također, bitno je koja je faza unutar komore, led ili voda. Ukoliko je led, temperatura označava temperaturu injišta, a za vodu je to temperatura rošenja. Potrebno je korigirati temperaturu rošenja s obzirom na tlakove budući da se ona mijenja ovisno o tome na kojem je tlaku. Nakon što je poznata referentna temperatura rošenja, potrebno je odrediti referentnu relativnu vlažnost, budući da se s njom uspoređuje vrijednost izmjerena umjeravanim instrumentom. Standardni PT100 – 385 osjetnici temperature imaju svoju korekciju koju je potrebno primijeniti kako bi se dobile ispravne referentne vrijednosti. Korekcije su dobivene umjeravanjem osjetnika u više točaka, a kako bi se mogli koristiti u svim temperaturnim točkama, a ne samo u onima u kojima su umjereni, određeni su njihovi individualni koeficijenti. Budući da je nama potrebna korekcija za 20 °C, jer to je temperatura zraka pri kojoj se higrometar umjeravao, a termometri su umjereni upravo u toj točki, korekcija je lako provedena. Korekcija tih termometara dobivena je kao razlika srednje vrijednosti očitavanja u nekom periodu i srednje vrijednosti etalonskih termometara. Ta vrijednost dodana je na izračunatu srednju vrijednost temperature zraka tijekom umjeravanja te je dobivena referentna vrijednost. Podsjetnik: korekcija je vrijednost koju umjeravanom instrumentu treba dodati ili

oduzeti kako bi došao na vrijednost etalona, a odstupanje je obrnuto od toga, koliko je umjeravani instrument odmaknut od etalona. Što se tiče budžeta nesigurnosti, on se malim dijelom razlikuje u odnosu na budžet nesigurnosti za usporedbenu metodu. U njemu se nalaze dodatni utjecaji kao što je npr. čistoća vode u saturatoru i sl. Neke vrijednosti su iskustvene, a neke su određene prilikom karakterizacije saturatora. Na kraju, kada su poznate sve potrebne vrijednosti s referentnog i umjeravanog instrumenta, potrebno je napraviti analizu rezultata te donijeti zaključak o odstupanjima umjeravanog instrumenta i pripadnim nesigurnostima umjeravanja, što je obrađeno u sljedećem poglavlju.

5. ANALIZA REZULTATA

Po dolasku instrumenta namijenjenog za umjeravanje u laboratorij potrebno je odrediti vrijednosti relativnih vlažnosti i temperatura okoline na kojima će se provesti umjeravanje, odnosno odrediti umjerne točke. Odabir je takav da se ravnomjerno pokrije mjerni raspon u kojem će se instrument koristiti. Na temelju željenih temperatura i relativnih vlažnosti računaju se pripadne temperature rošenja. Temperature rošenja u ovom su se radu izračunavale upotrebom računalnog programa „HumiCalc“. Vrijednosti temperatura, relativnih vlažnosti i pripadnih temperatura rošenja na kojima je instrument umjeravan prikazane su u tablici 3. Umjeravanja se provode uzlaznim redoslijedom, tako da je se ide od najniže temperature rošenja prema najvišoj.

Tablica 3. Točke umjeravanja instrumenta

Relativna vlažnost, %	Temperatura, °C	Rosište/injište, °C
10	20	-11,2
30	20	1,9
70	20	14,37
90	30	28,2
70	50	42,99
50	70	54,8
90	70	67,6

Tijekom izrade ovog rada korištena su dva različita referentna instrumenta tj. dva različita mjerna sustava. Umjeravanja u prve dvije umjerne točke provedena su upotrebom primarnog generatora zraka poznatog injišta/rosišta, koristeći termostatiranu komoru i saturator, budući da te temperature rošenja nije moguće postići u komori za usporedbeno umjeravanje. U ostalim točkama, instrument je umjeravan usporedbenom metodom, koja je jednostavnija i dovoljno točna za ovakav tip instrumenta.

5.1. Točka umjeravanja 10 %RV, 20 °C – metoda umjeravanja pomoću primarnog generatora

Prva točka umjeravanja je provedena pri temperaturi injišta od -11,2 °C. U tablicama 4, 5 i 6 prikazani su podaci koji su dobiveni mjerenjem te naknadnom obradom i korigiranjem rezultata.

U tablici 4 prikazane su vrijednosti izmjerene referentnim instrumentom s kojim će se uspoređivati vrijednosti izmjerene umjeranim instrumentom (Tablica 5). Također, u tablici 6 dane su vrijednosti tlakova izmjerene barometrom, koje su korištene za izračunavanje referentnih vrijednosti. U svakoj od tablica prikazano je i vrijeme početka i kraja mjerenja. Ovo je primjer procesa obrade podataka za metodu umjeravanja pomoću primarnog generatora točke rose. Isto je ponovljeno i za drugu umjernu točku s temperaturom rošenja od 1,9 °C.

Tablica 4. Etalonske vrijednosti za točku 10 %RV, 20 °C

Etalon	T_{dp}, °C	T_a, °C	RV, %RV
Srednja vrijednost očitavanja	-11,219	20,009	-
Standardna devijacija	0,002	0,000	-
Referentna vrijednost	-11,227	19,907	10,017
	početak	kraj	
Vrijeme mjerenja	12:55:58	13:25:58	

Tablica 5. Vrijednosti izmjerene umjeranim instrumentom za točku 10 %RV, 20 °C

Umjeravani instrument	T_{dp}, °C	T_a, °C	RV, %RV
Srednja vrijednost očitavanja	-	19,89	10,94
Standardna devijacija	-	0,03	0,04
	početak	kraj	
Vrijeme mjerenja	12:55:40	13:25:40	

Tablica 6. Vrijednosti tlaka za točku 10 %RV, 20 °C

Barometar PTB330	p_1, hPa	p_2, hPa
Srednja vrijednost očitavanja	1008,06	1007,43
Standardna devijacija	0,137	0,117
	početak	kraj
Vrijeme mjerenja	12:55:56	13:25:56

5.1.1. Nakon provjere

Nakon završenog mjerenja, radi se kontrola stanja zraka na izlazu iz male komore. Ukoliko ne postoji propuštanje ni gradijenti apsolutne vlažnosti zraka u maloj komori, ono bi trebalo biti jednako stanju zraka na njenom ulazu. Cijev koja ide na kontrolni instrument, MBW higrometar točke rose, prespaja se s ulaza u komoru na izlaz iz komore. Ponovno se pokreće proces mjerenja te se bilježe rezultati. Rezultati su naknadno obrađeni kao i za slučaj prvog mjerenja. Iz rezultata prikazanih u tablicama 7, 8 i 9 vidljivo je da su oni gotovo jednaki onima iz prvog mjerenja, što znači da je kontrola uspješna te je stanje na izlazu iz male komore gotovo nepromijenjeno u odnosu na stanje na njenom ulazu. Ovakva provjera napravljena je i nakon umjeravanja u drugoj umjernoj točki, pri temperaturi rošenja 1,9 °C. Provjera je također pokazala da je stanje zraka na izlazu zadovoljavajuće u odnosu na stanje zraka na ulazu u malu komoru.

Tablica 7. Etalonske vrijednosti za točku 10 %RV, 20 °C nakon provjere

Etalon	T_{dp} , °C	T_a , °C	RV, %RV
Srednja vrijednost očitavanja	-11,220	19,998	-
Standardna devijacija	0,001	8,741E-05	-
Referentna vrijednost	-11,229	19,896	10.021
	početak	kraj	
Vrijeme mjerenja	13:35:58	13:59:58	

Tablica 8. Vrijednosti izmjerene umjeravanim instrumentom za točku 10 %RV, 20 °C nakon provjere

Umjeravani instrument	T_{dp} , °C	T_a , °C	RV, %RV
Srednja vrijednost očitavanja	-	19,89	10,66
Standardna devijacija	-	0,01	0,01
	početak	kraj	
Vrijeme mjerenja	13:36:02	14:00:02	

Tablica 9. Vrijednosti tlaka za točku 10 %RV, 20 °C nakon provjere

Barometar PTB330	p_1 , hPa	p_2 , hPa
Srednja vrijednost očitavanja	1008,19	1007,32
Standardna devijacija	0,200	0,161
	početak	kraj
Vrijeme mjerenja	13:35:58	0.58331

5.2. Točka umjeravanja 70 %RV, 20 °C – metoda usporedbenog umjeravanja

Nakon umjeravanja provedenih u prve dvije umjerne točke, umjeravanje se nastavlja u drugoj prostoriji. Umjeravanja u preostalim 5 umjernih točaka provedena su metodom usporedbe. Prva od točaka u kojima je umjeravan instrument na ovaj način je točka na temperaturi rošenja 14,37 °C. U tablici 10 dane su vrijednosti izmjerene referentnim instrumentom, a u tablici 11 vrijednosti izmjerene umjeranim instrumentom. Prikazani su rezultati dobiveni nakon obrade rezultata mjerenja te nakon provedenih korekcija. U tablicama je navedeno i vrijeme početka i kraja mjerenja. Za razliku od umjeravanja metodom pomoću primarnog generatora, kod metode usporedbenog umjeravanja nema podataka o vrijednostima tlaka, budući da oni nisu relevantni za rezultate umjeravanja.

Tablica 10. Etalonske vrijednosti za točku 70 %RV, 20 °C

Etalon	T_{dp} , °C	T_a , °C	RV, %RV
Srednja vrijednost očitavanja	14,681	20,391	-
Standardna devijacija	0,016	0,004	-
Referentna vrijednost		20,321	70,607
	početak	kraj	
Vrijeme mjerenja	13:50:06	14:00:06	

Tablica 11. Vrijednosti izmjerene umjeranim instrumentom za točku 70 %RV, 20 °C

Umjeravani instrument	T_{dp} , °C	T_a , °C	RV, %RV
Srednja vrijednost očitavanja	14,77	20,30	70,52
Standardna devijacija	0,02	0,01	0,07
	početak	kraj	
Vrijeme mjerenja	13:49:53	13:59:53	

5.2.1. Ponovljivost

Upravo ova točka umjeravanja je korištena za izračun ponovljivosti. Umjeravanje u ovoj točki provedeno je jedan dan pa zatim ponovljeno idući dan. Na taj način moguće je analizirati ponašanje umjeravanog instrumenta po pitanju ponovljivosti. Rezultati dobiveni mjerenjem drugi dan, prikazani su u tablicama 12 i 13. Na sličan način, provedena je i analiza histereze umjeravanog instrumenta. Ona je provedena na temperaturi rošenja od 28,2 °C. Nakon odrađenog prvog mjerenja na toj točki te nakon odrađenog umjeravanja u svim ostalim točkama, s visokih vrijednosti relativne vlažnosti komora se ponovno namješta na temperaturu rošenja 28,2 °C kako bi se usporedili rezultati dvaju mjerenja. Na taj način određuje se histereza umjeravanog instrumenta. Za preostale 3 točke, u kojima su umjeravanja provedena metodom usporedbe, podaci su obrađeni i prikazani na isti način kao i u tablicama 10 i 11, no bez ponavljanja mjerenja budući se dobivene vrijednosti ponovljivosti i histereze koriste pri izračunu mjerne nesigurnosti za sve ostale točke.

Tablica 12. Etalonske vrijednosti za točku 70 %RV, 20 °C – ponovljivost

Etalon	T_{dp} , °C	T_a , °C	RV, %RV
Srednja vrijednost očitavanja	14,954	20,375	-
Standardna devijacija	0,007	0,003	-
Referentna vrijednost		20,305	71,934
	početak	kraj	
Vrijeme mjerenja	11:27:54	11:37:54	

Tablica 13. Vrijednosti izmjerene umjeranim instrumentom za točku 70 %RV, 20 °C – ponovljivost

Umjeravani instrument	T_{dp} , °C	T_a , °C	RV, %RV
Srednja vrijednost očitavanja	15,22	20,29	72,62
Standardna devijacija	0,01	0,01	0,05
	početak	kraj	
Vrijeme mjerenja	11:27:52	11:37:52	

5.3. Ukupni rezultat umjeravanja

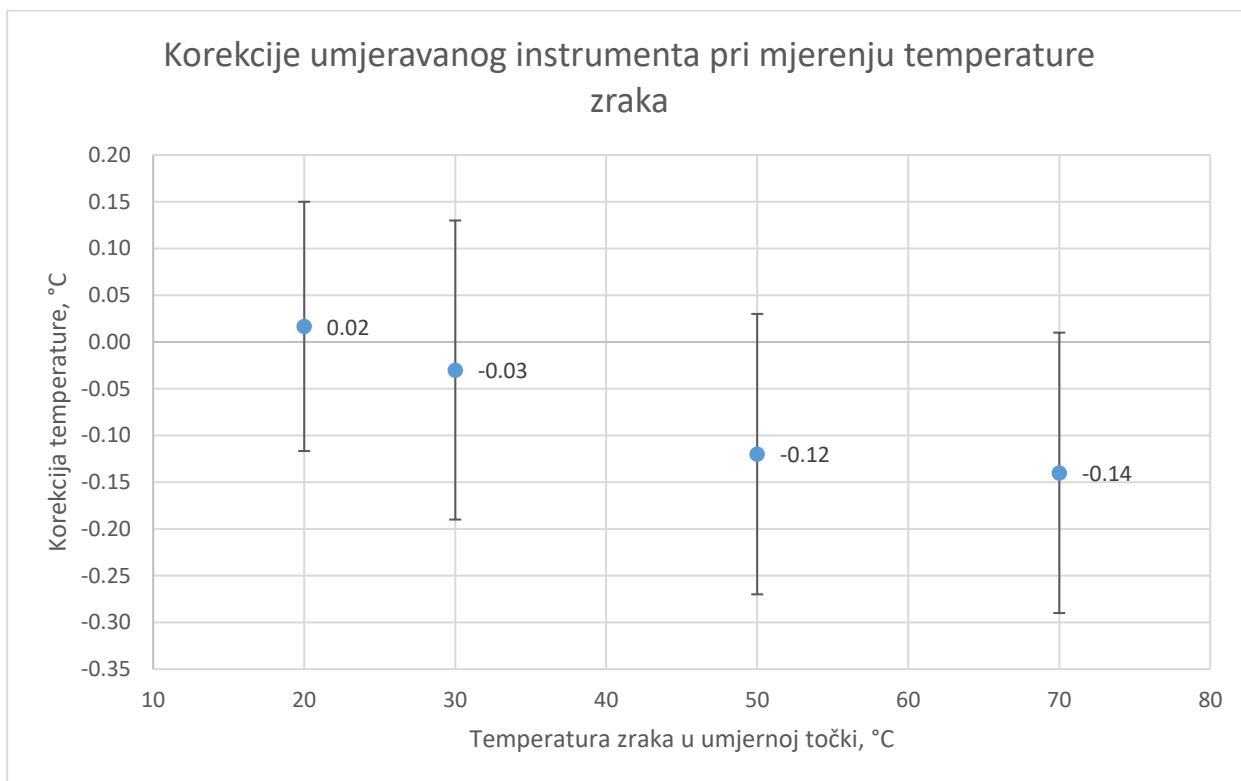
Nakon provedbe umjeravanja u svim odabranim umjernim točkama, te nakon odgovarajuće obrade tih podataka, dobiven je konačni rezultat umjeravanja kao što je prikazano u tablici 14. U tablici su prikazane temperatura okoline umjeravanog instrumenta i relativna vlažnost koje daju referentni instrument i umjeravani instrument za svaku točku umjeravanja. Također, dana je korekcija, dobivena kao razlika vrijednosti referentnog instrumenta i umjeravanog instrumenta. Dakle, korigirana vrijednost dobivena umjeranim instrumentom bi bila: korigirana vrijednost = očitavanje + korekcija. Iznos korekcije je korisniku jedan od najvažnijih podataka, najvažnije mu je znati koliko treba korigirati vrijednost koju prikazuje njegov instrument kako bi dobio stvarnu vrijednost. Uz korekciju, prikazana je i vrijednost proširene mjerne nesigurnosti. Iznos proširene mjerne nesigurnosti govori korisniku da može s 95 %-tnom sigurnošću znati da se stvarna vrijednost nalazi u intervalu vrijednosti koju prikazuje njegov instrument \pm iznos proširene mjerne nesigurnosti.

Tablica 14. Rezultat umjeravanja

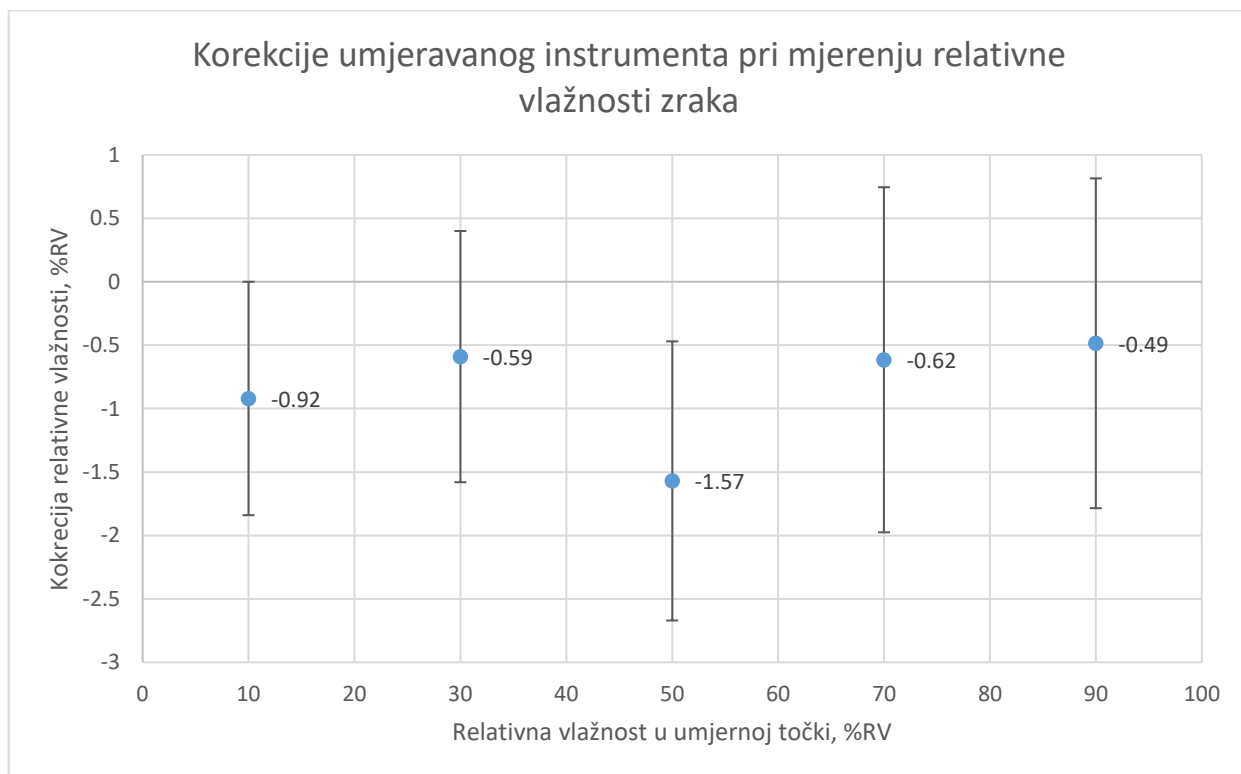
Referentni instrument		Umjeravani instrument		Korekcija		Proširena mjerna nesigurnost	
T_a , °C	RV , %RV	T_a , °C	RV , %RV	T_a , °C	RV , %RV	°C	%RV
19,91	10,02	19,89	10,94	0,02	-0,92	0,14	0,92
19,82	30,38	19,80	30,97	0,02	-0,59	0,13	0,99
20,31	71,27	20,30	71,57	0,01	-0,30	0,13	1,36
30,28	91,26	30,31	91,46	-0,03	-0,20	0,16	1,30
50,09	71,45	50,21	72,38	-0,12	-0,93	0,15	1,21
69,52	52,86	69,62	54,43	-0,10	-1,57	0,15	1,10
70,03	90,31	70,21	91,08	-0,18	-0,77	0,15	1,25

Na temelju vrijednosti prikazanih u tablici 14, napravljeni su dijagrami prikazani na slikama 25 i 26. Dijagrami prikazuju ovisnost korekcije umjeravanog instrumenta o temperaturi rošenja pri mjerenju temperature zraka i relativne vlažnosti zraka. Vidljivo je kako su korekcije najmanje u području nižih temperatura rošenja. Iz tablice s rezultatima se može zaključiti kako umjeravani instrument radi s relativno visokom točnošću. Korekcija za temperaturu okoline varira između 0,01 °C i -0,18 °C što znači da umjeravani instrument pokazuje temperaturu dosta blizu

temperature koju pokazuje referentni instrument. Najmanje korekcije su za prve 4 točke, gdje su temperature rošenja između $-11,2\text{ °C}$ i $28,2\text{ °C}$. Za posljednje tri točke, gdje su temperature rošenja nešto više te se kreću od $42,99\text{ °C}$ do $67,6\text{ °C}$, korekcije za temperaturu zraka se kreću od $-0,10\text{ °C}$ do $-0,18\text{ °C}$ što je i dalje zadovoljavajuće. Što se tiče relativne vlažnosti odstupanja su nešto veća nego kod mjerenja drugih veličina kao što je npr. temperatura. Korekcije umjeravanog instrumenta kod mjerenja relativne vlažnosti kreću se između $-0,20\text{ %RV}$ i $-1,57\text{ %RV}$. Najmanje korekcije potrebne su pri mjerenju na temperaturama rošenja od $14,37\text{ °C}$ i $28,2\text{ °C}$. Najveća korekcija, iznosa $-1,57\text{ %RV}$, javlja se pri mjerenju na temperaturi rošenja $54,8\text{ °C}$. No, za umjeravani instrument sve točke s visokim temperaturama rošenja imaju relativno velike iznose korekcija. Iako, i dalje su to dovoljno dobri rezultati, s obzirom na primjenu instrumenta. Posljednja dva stupca tablice govore o proširenoj mjernoj nesigurnosti. Ona je izražena u stupnjevima Celzijevim i postocima relativne vlažnosti. Iznosi proširenih mjernih nesigurnosti za mjerilo temperature kreću se između $0,13\text{ °C}$ i $0,16\text{ °C}$, a za mjerilo relativne vlažnosti između $0,92\text{ %RV}$ i $1,36\text{ %RV}$. To govori da su stvarne vrijednosti temperature i relativne vlažnosti zraka dovoljno blizu izmjerenih vrijednosti, nakon što se na njih primijene pripadne korekcije. Na kraju se može zaključiti da je umjeravani instrument, za svoju primjenu, umjeren s zadovoljavajućom proširenom mjernom nesigurnošću. Na dijagramima prikazanim na slikama 25 i 26, na vrijednost korekcije umjeravanog instrumenta za svaku mjernu točku dodan je i oduzet odgovarajući iznos proširene mjerne nesigurnosti. Na taj način, dobiveni su intervali vrijednosti korekcije koji primijenjeni na izmjerenu vrijednost daju interval vrijednosti mjerene veličine, unutar kojeg se s 95 %-tnom sigurnošću nalazi stvarna vrijednost mjerene veličine. Na dijagramu na slici 25 se vidi kako korekcija umjeravanog instrumenta pri mjerenju temperature zraka raste s povećanjem temperature. Intervali mjerne nesigurnosti pri mjerenju temperature zraka su relativno uski, što znači da instrument mjeri temperaturu zraka s malom nesigurnošću. Što se tiče korekcija umjeravanog instrumenta pri mjerenju relativne vlažnosti zraka (Slika 26) instrument ima najveću korekciju na sredini mjernog područja. Za intervale mjerne nesigurnosti je vidljivo kako su oni širi za veće iznose relativne vlažnosti zraka i obrnuto, uži za niže iznose relativne vlažnosti. Što ponovno potvrđuje tendenciju instrumenta za mjerenje relativne vlažnosti, da im obično s porastom relativne vlažnosti zraka raste nesigurnost umjeravanja.



Slika 25. Korekcije umjeravanog instrumenta pri mjerenju temperature zraka



Slika 26. Korekcije umjeravanog instrumenta pri mjerenju relativne vlažnosti zraka

6. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bilo je umjeravanje etalonskog mjerila relativne vlažnosti zraka. Umjeravanje je provedeno u Laboratoriju za procesna mjerenja, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Po dolasku umjeravanog instrumenta u laboratorij, određeno je sedam točaka u kojima se provelo umjeravanje. Budući da točke obuhvaćaju širok spektar temperatura rošenja, pri umjeravanju su se koristile dvije različite mjerne linije, kao i metode umjeravanja. Proces umjeravanja trajao je nekoliko dana, sve dok nisu uspješno provedena mjerenja u svim zadanim umjernim točkama te dok rezultati mjerenja nisu zadovoljavali. U radu su detaljno opisana oba postupka umjeravanja te prije opisa samog umjeravanja dane su teorijske osnove vezane uz mjerenje relativne vlažnosti zraka. Na temelju opisanih metoda, zaključuje se kako je umjeravanje pomoću primarnog generatora točke rose točnije jer se kod njega koristi najbolja dostupna oprema za postizanje i mjerenje temperature rošenja. Iz tog razloga, metoda se koristi samo za umjeravanje najpreciznijih mjerila ili kad se nekom drugom metodom ne mogu postići željeni uvjeti. Iz drugog razloga, za prve dvije točke umjeravanja u ovom radu korištena je metoda umjeravanja pomoću primarnog generatora točke rose, dok je za ostalih pet točaka korišteno usporedbeno umjeravanje mjerenjem temperature točke rose. Usporedbeno umjeravanje jednostavnije je za izvesti te u ovom slučaju, daje zadovoljavajuće i dovoljno točne rezultate. Kako bi se zapravo znalo koliko su dobiveni rezultati točni, u sklopu procesa umjeravanja izvršena je i procjena mjerne nesigurnosti. U radu je bilo potrebno odrediti utjecajne parametre na konkretno mjerenje te na temelju njihovih vrijednosti zaključiti o važnosti njihovog utjecaja na konačni rezultat. Cilj procjene mjerne nesigurnosti je određivanje vrijednost proširene mjerne nesigurnosti. Ona govori korisniku instrumenta vrlo važnu informaciju o kvaliteti mjernog rezultata. Na temelju nje, korisnik s određenom sigurnošću može očekivati da se stvarna vrijednost mjerene veličine nalazi unutar određenog intervala. Vrijednost koju pokazuje instrument i proširena mjerna nesigurnost čine navedeni interval. Osim iznosa proširene mjerne nesigurnosti, na kraju procesa umjeravanja u sklopu ovog rada, dan je iznos korekcije za svaku točku umjeravanja. Korekcija je iznos koji je potrebno dodati ili oduzeti vrijednosti koju pokazuje umjeravani instrument, kako bi vrijednost bila jednaka onoj na referentnom instrumentu, odnosno kako bi ta vrijednost bila dovedena u vezu s definicijom mjerene veličine. Taj podatak je korisniku mjerila relativne vlažnosti zraka vrlo važan te na temelju njega zaključuje o tome koliko točno njegov instrument radi u određenom mjernom području. Na kraju rada, rezultati su prikazani tablično i grafički. Iz njih je moguće zaključiti kako instrument zadovoljava svojom točnošću te se može koristiti kao etalonsko mjerilo relativne vlažnosti zraka.

LITERATURA

- [1] Heinonen, M., Keskus, M.: Uncertainty in humidity measurements, Publication of the EUROMET Workshop P758, Espoo, 2006.
- [2] Umjeravanje i sljedivost rezultata mjerenja, <https://www.svijet-kvalitete.com/index.php/umjeravanje/1149-umjeravanje-i-sljedivost-rezultata-mjerenja>, 5.11.2022.
- [3] Galović, A.: Termodinamika II, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [4] Calibration of relative humidity meters CP-VL02, FSB – LPM
- [5] Meaco Measurement and Control, <https://meaco.co.uk/shop/monitoring/handhelds/rotronic-handhelds/rotronic-hygropalm-hp32/>, 15.11.2022.