

Projekt sustava za umjeravanje mjerila tlaka okoline

Mijić, Ines

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:360958>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-31**

Repository / Repozitorij:

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



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Projekt sustava za umjeravanje mjerila tlaka okoline

Ines Mijić

Zagreb, 2024.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

prof. dr. sc. Lovorka Grgec-Bermanec

Student:

Ines Mijić

Zagreb, 2024.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

| | |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 1 | |
| Ur.broj: 15 – 24 – | |

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ines Mijić**

JMBAG: **35223409**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Projekt sustava za umjeravanje mjerila tlaka okoline**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Design of ambient pressure gauges calibration system**

Opis zadatka:

Za potrebe umjeravanja instrumenata za mjerenje tlaka okoline potrebno je projektirati i realizirati etalonski sustav u mjernom području od 800 hPa do 1200 hPa. U radu koristiti postojeću mjernu opremu Laboratorija za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Potrebno je izraditi:

- Pregled metoda mjerenja tlaka okoline,
- Pregled metoda za ispitivanje i umjeravanje barometara,
- Opis etalonskog mjernog sustava s barokomorom,
- Opis etalonskog mjernog sustava s tlačnom vagom,
- Postupak umjeravanja s prijedlogom pripadajućih mjernih listova,
- Postupak za procjenu mjerne nesigurnosti,
- Primjer umjeravanja s rezultatima,

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

Datum predaje rada:

1. rok: 22. i 23. 2. 2024.
2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26. 2. – 1. 3. 2024.
2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Lovorka Grgec Bermanec

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

| | |
|--|------------|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA..... | III |
| POPIS TABLICA | IV |
| POPIS OZNAKA..... | V |
| SAŽETAK | 1 |
| SUMMARY | 2 |
| 1. PREGLED METODA MJERENJA TLAKA OKOLINE | 3 |
| 1.1. <i>Direktna mjerila tlaka.....</i> | 3 |
| 1.1.1. Živin manometar | 3 |
| 1.1.2. Aneroidni barometar | 4 |
| 1.1.3. Manometar s U-cijevi..... | 5 |
| 1.1.4. Manometri s elastičnom šupljom cijevi- Bourdonova cijev | 6 |
| 1.3. <i>Elektronički senzori tlaka</i> | 6 |
| 2. PREGLED METODA ZA ISPITIVANJE I UMJERAVANJE BAROMETARA..... | 8 |
| 2.1. <i>Sljedivost i umjeravanje.....</i> | 8 |
| 2.2. <i>Metrologijski zahtjevi</i> | 9 |
| 2.3. <i>Tehnički zahtjevi</i> | 10 |
| 2.3.1 <i>Tehnički zahtjevi za barometre s elastičnim osjetnim elementima</i> | 10 |
| 2.4. <i>Gradacija.....</i> | 11 |
| 2.5. <i>Dodatne oznake</i> | 11 |
| 2.6. <i>Umjeravanje barometra prema OIML R 97</i> | 11 |
| 2.6.1. <i>Opći zahtjevi</i> | 11 |
| 2.6.2. <i>Uvjeti umjeravanja.....</i> | 11 |
| 2.6.3. <i>Postupak umjeravanja</i> | 12 |
| 2.6.4. <i>Izvještaj o umjeravanju</i> | 12 |
| 3. OPIS ETALONSKOG MJERNOG SUSTAVA S BAROKOMOROM | 14 |
| 3.1. <i>Opis opreme.....</i> | 14 |
| 4. OPIS ETALONSKOG MJERNOG SUSTAVA S TLAČNOM VAGOM..... | 20 |
| 4.1. <i>Opis tlačne vage</i> | 20 |
| 4.1.1. <i>Vrste tlačnih vaga.....</i> | 21 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2. Umjeravanje etalona pomoću tlačne vage | 23 |
| 4.2.1. Referentni i radni etaloni..... | 23 |
| 4.2.2. Umjeravanje etalona pomoću tlačne vage prema uputama DKD-R 6-1..... | 24 |
| 5. Postupak umjeravanja | 26 |
| 6. MJERNA NESIGURNOST | 29 |
| 6.1. Proračun nesigurnosti za umjeravanje barometra Testo 176P1 (TEOKO9) | 30 |
| 6.2. Proračun nesigurnosti za umjeravanje barometra proizvođača Lufft..... | 32 |
| 6.3. Proračun nesigurnosti za umjeravanje barometra proizvođača Ruska..... | 34 |
| 7. ZAKLJUČAK..... | 37 |
| LITERATURA..... | 38 |

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 1. Živin barometar..... | 4 |
| Slika 2. Aneroidni barometar | 5 |
| Slika 3. U-manometar | 5 |
| Slika 4. Bourdonova cijev | 6 |
| Slika 5. Lanac sljedivosti | 8 |
| Slika 6. Vakuumsko tlačna barokomora | 15 |
| Slika 7. Vakuumsko tlačna pumpa | 16 |
| Slika 8. Etalonski barometar Vaisala PTB 220..... | 17 |
| Slika 9. Barometar proizvođača Lufft | 18 |
| Slika 10. Barometar Ruska..... | 19 |
| Slika 11. Barometar Testo PTB 220 | 19 |
| Slika 12. Uređaj Testo 175H1 za mjerenje temperature i vlažnosti zraka..... | 19 |
| Slika 13. Spremnik dušika..... | 22 |
| Slika 14. Tlačna vaga | 22 |
| Slika 15. Utezi koji dolaze uz tlačnu vagu | 23 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Maksimalna odstupanja po razredima točnosti | 9 |
| Tablica 2. Tehničke karakteristike vakuumske tlačne barokomore..... | 14 |
| Tablica 3. Tehničke karakteristike etalonskog barometra | 17 |
| Tablica 4. Tehničke karakteristike umjeranih barometara | 18 |
| Tablica 5. Tehničke karakteristike tlačne vage TLVAG09 | 21 |
| Tablica 6. Nizovi umjeravanja..... | 25 |
| Tablica 7. Prikaz očitavanja etalonskog barometra..... | 26 |
| Tablica 8. Prikaz rezultata umjeravanja barometra TEOKO9..... | 27 |
| Tablica 9. Rezultati umjeravanja barometra proizvođača Lufft | 27 |
| Tablica 10. Rezultati umjeravanja barometra proizvođača Ruska | 28 |
| Tablica 11. Podaci dobiveni uređajem Testo 175H1 | 28 |
| Tablica 12. Mjerna nesigurnost točke 1..... | 30 |
| Tablica 13. Mjerna nesigurnost točke 2..... | 30 |
| Tablica 14. Mjerna nesigurnost točke 3..... | 31 |
| Tablica 15. Mjerna nesigurnost točke 4..... | 31 |
| Tablica 16. Mjerna nesigurnost točke 5..... | 31 |
| Tablica 17. Mjerna nesigurnost točke 6..... | 32 |
| Tablica 18. Mjerna nesigurnost točke 1..... | 32 |
| Tablica 19. Mjerna nesigurnost točke 2..... | 32 |
| Tablica 20. Mjerna nesigurnost točke 3..... | 33 |
| Tablica 21. Mjerna nesigurnost točke 4..... | 33 |
| Tablica 22. Mjerna nesigurnost točke 5..... | 33 |
| Tablica 23. Mjerna nesigurnost točke 6..... | 34 |
| Tablica 24. Mjerna nesigurnost u točki 1 | 34 |
| Tablica 25. Mjerna nesigurnost u točki 2 | 35 |
| Tablica 26. Mjerna nesigurnost u točki 3 | 35 |
| Tablica 27. Mjerna nesigurnost u točki 4 | 35 |
| Tablica 28. Mjerna nesigurnost u točki 5 | 36 |
| Tablica 29. Mjerna nesigurnost u točki 6 | 36 |

POPIS OZNAKA

| OZNAKA | JEDINICA | OPIS |
|--------------------------------|----------|--|
| p | Pa | Tlak |
| F | N | Sila |
| A_e | m^2 | Površina |
| m | kg | Masa utega |
| g | m^2/s | Gravitacijsko ubrzanje |
| p_e | mbar | Tlak etalona |
| p_m | mbar | Stvarna vrijednost etalonskog tlaka |
| p_i | mbar | Tlak ispitivanog mjerila |
| δp_i | mbar | Odstupanje dobiveno radi metode umjeravanja |
| $\delta p_{nulta\ devijacija}$ | mbar | Odstupanje radi nulte devijacije |
| U | mbar | Ukupna mjerna nesigurnost |
| k | - | Faktor prekrivanja |
| u_e | mbar | Standardna mjerna nesigurnost etalona |
| u_m | mbar | Standardna mjerna nesigurnost umjeravanog mjerila |
| u_i | mbar | Standardna mjerna nesigurnost zbog odabrane metode umjeravanja |
| $u_{standard,e}$ | mbar | Mjerna nesigurnost propisana potvrdom o umjeravanju etalona |
| $u_{rezolucije,m}$ | mbar | Mjerna nesigurnost zbog rezolucije mjerila |
| $u_{ponovljivost}$ | mbar | Mjerna nesigurnost s obzirom na ponovljivost |
| $u_{histereza}$ | mbar | Mjerna nesigurnost u ovisnosti o histerezi |

SAŽETAK

U uvodnom djelu rada dan je pregled metoda za mjerenje tlaka okoline. Opisani su mjerni instrumenti i njihov princip rada. Nadalje, rad se bavi pregledom metoda za ispitivanje i umjeravanje barometara. U sklopu toga opisane su metode, tehnički i metrologijski zahtjevi prema mjerilima tlaka okoline i opisan postupak umjeravanja prema odabranoj metodi.

Za potrebe umjeravanja instrumenta za mjerenje tlaka potrebno je projektirati etalonski sustav u mjernom području od 800 hPa do 1200 hPa. Umjeravanja su provedena prema smjernicama OIML-a uz pomoć barokomore. Stoga je u nastavku rada opisan etalonski mjerni sustav s barokomoram. Elementi mjernog sustava nalaze se u Laboratoriju za procesna mjerenja. Etalonski mjerni sustav s barokomoram sastoji se od barokomore kao osnovnog elementa, vakuumske tlačne pumpe, umjeravanih barometara, etalonskog barometra i uređaja za mjerenje uvjeta okoline. Opisani su svi elementi takvoga sustava zajedno s njihovim tehničkim podacima. Umjeravanje je izvedeno za barometar Testo 176P1 s mjernim rasponom od 600 do 1100 mbar, barometar proizvođača Lufft s mjernim rasponom od 860-1100 mbar i barometar proizvođača Ruska s mjernim rasponom od 0 do 2600 mbar. Kao etalonsko mjerilo korišten je barometar Vaisala PTB220 koji ima mjerni raspon od 500 do 1100 mbar. Mjerenja su napravljena u mjernom području od 876 do 1040 mbar. Rezultati su prikazani u tablicama. Etalonski barometar umjeren je uz pomoć tlačne vage, stoga je u radu opisan princip rada tlačne vage, te postupak umjeravanja etalona s tlačnom vagom prema DKD-R 6-1.

Na kraju je opisan postupak za izračun mjerne nesigurnosti. Mjerna nesigurnost zatim je izračunata za sva tri barometra.

SUMMARY

The introductory part of the paper provides an overview of methods for measuring ambient pressure. Measuring instruments and their working principles are described. Furthermore, the paper reviews methods for testing and calibrating barometers. As part of this, the methods, technical, and metrological requirements for ambient pressure measuring instruments are described, along with the calibration process according to the selected method.

For the purpose of calibrating a pressure measuring instrument, it is necessary to design a reference system in the measurement range from 800 hPa to 1200 hPa. The calibration were carried out according to OIML guidelines using a pressure chamber. The elements of the measuring system are located in the Laboratory for Process Measurements. The reference measuring system with a barochamber consists of the barochamber as the main element, a vacuum pressure pump, the barometers to be calibrated, a reference barometer, and a device for measuring environmental conditions. All elements of such a system are described together with their technical specifications. Calibration was carried out for the Testo 176P1 barometer with a measuring range of 600 to 1100 mbar, the Lufft barometer with a measuring range of 860-1100 mbar, and the Ruska barometer with a measuring range of 0 to 2600 mbar. The Vaisala PTB220 barometer, with a measuring range of 500 to 1100 mbar, was used as the reference standard. Measurements were made in the range from 876 to 1040 mbar. The results are presented in tables. The reference barometer was calibrated using a pressure balance, therefore the working principle of the pressure balance is described in the paper, as well as the procedure for calibrating the reference with the pressure balance according to DKD-R 6-1.

At the end, the procedure for calculating measurement uncertainty is described. The measurement uncertainty was then calculated for all three barometers.

1. PREGLED METODA MJERENJA TLAKA OKOLINE

Za mjerenje tlaka okoline ili atmosferskog tlaka postoji nekoliko metoda i instrumenata od kojih su najzastupljeniji barometri, manometri, elektronski senzori tlaka i sustavi diferencijalnog tlaka. U ovoj točki ćemo pregledati glavne metode, opisati njihov princip rada, te pregledati njihove prednosti i ograničenja.

Mjerenje tlaka okoline može se obavljati uz pomoć dvije različite metode, a to su direktna i indirektna metoda.

Direktna metoda mjerenja tlaka okoline zapravo mjeri silu, u najčešćem slučaju mehaničku deformaciju mjernog elementa. Mjerači koji se koriste direktnom metodom sastoje se uglavnom od senzora pritiska i uređaja za napajanje senzora i mjerenje električnog signala iz njega. Mjerila koja se služe direktnom metodom mogu se podijeliti na ona kod kojih je princip mjerenja stupac tekućine, djelovanje sile na poznatu površinu ili mehanička deformacija. Mjerenja koja se dobiju direktnom metodom ne ovise o vrsti plina.

Indirektna metoda je metoda kod koje se mjerenje izvodi neposredno na način da se tlak određuje korištenjem jednadžbe stanja idealnog plina. Očitavanja koja se dobiju s mjeracima koji rade indirektnom metodom ovise o vrsti plina. Mjerila koja rade indirektnom metodom mogu se podijeliti prema principu mjerenja na mjerila koja mjere viskozitet, mjerila koja mjere toplinsku vodljivost i mjerila koja mjere ionizaciju.

Kako bi smo znali kojom se metodom i vrstom mjerila tlaka služiti moramo poznavati mjerilo. Moramo znati njegovo mjerno područje, tj. kolika je njegova maksimalna i minimalna vrijednost koju može pokazati.

Ovisno u kakvim uvjetima se radi, odnosno koliko je bitno da očitavanja mjerila tlaka budu precizna bitno je poznavati i podjelu skale mjernog instrumenta. U nekim uvjetima, kao što je naprimjer mjerenje tlaka okoline u laboratorijima, industrijskim postrojenjima i slično potrebno je da podjela skale bude što veća kako bi se uvidio utjecaj promjene tlaka. Dok pri mjerenjima tlaka okoline u stambenim prostorima i slično nije potrebno koristiti mjerila s velikom podjelom skale jer minimalne promjene tlaka koje će takve skale prikazati nisu potrebne.

Mjerila s vremenom mogu davati netočne rezultate zbog promjena svojih karakteristika, što znači da je svako mjerilo nakon određenog vremena potrebno ponovno umjeravati. Isto tako ako je mjerilo bilo na popravku, potrebno ga je ponovno umjeriti.

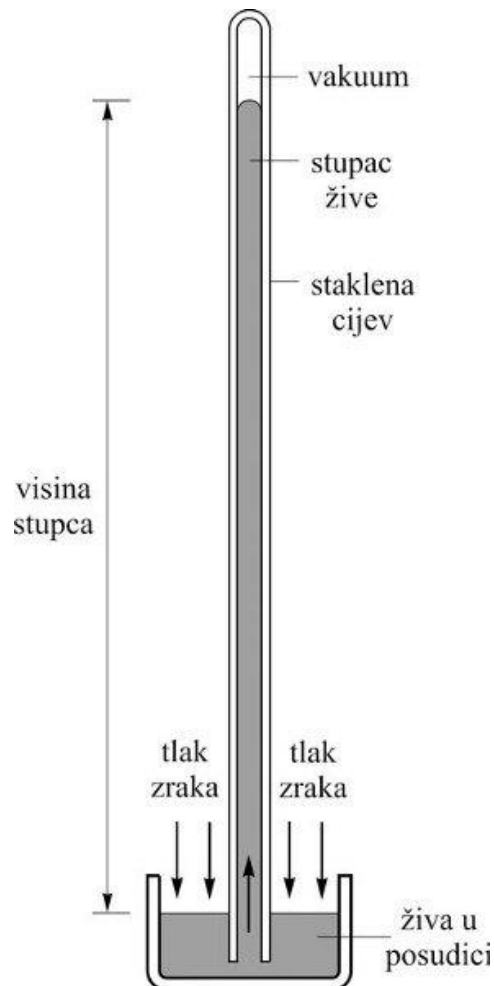
1.1. Direktna mjerila tlaka

Kao što je već napisano direktnom metodom mjerenja tlaka mjeri se sila, koja je najčešće mehanička deformacija mjernog elementa. Takva mjerila koristi se kod mjerenja vakuuma u rasponu od 10^{-4} do 10^5 Pa te malih tlakova. Mjerila koja se služe takvom metodom su: živin manometar, vodeni manometar, aneroidni barometar, plinske tlačne vage, hidraulične tlačne vage, membranska cijev, Bourdonova cijev, itd.

1.1.1. Živin manometar

Živin manometar najstariji je tip manometra čiji se princip rada temelji na ravnoteži tlaka zraka s tlakom žive u staklenoj cijevi. Živin manometar služi se direktnom metodom za mjerenje tlaka. Živa se nalazi u metalnoj posudi u koju je okomito uronjena staklena cijev. Cijev je

djelomice ispunjena živom, a iznad razine žive u drugom dijelu zatvorene cijevi nalazi se vakuum. Kada se atmosferski tlak poveća, razine žive u cijevi se diže, a kada tlak padne, razina se spušta. Prema konstrukciji posude sa živom razlikuju se dva tipa živina barometra: barometar s pomičnim dnom i barometar s reduciranom skalom. Živini barometri su vrlo precizni, no zbog zdravstvenih i ekoloških rizika danas su manje u uporabi. Nedostatak živinih barometara je taj što su nepraktični za prenošenje.



Slika 1. Živin barometar

1.1.2. Aneroidni barometar

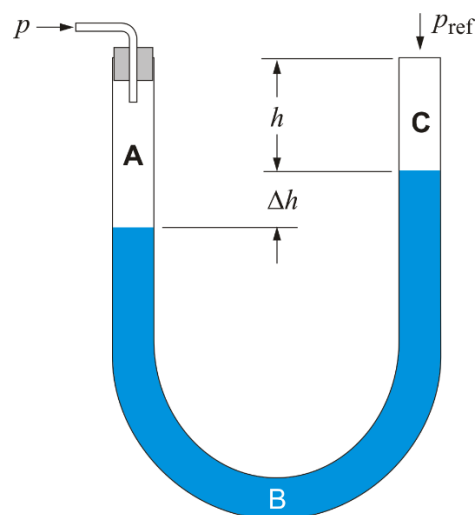
Ovaj tip barometra za svoj rad koristi zatvorenu metalnu kapsulu (aneroidna kapsula) koja se deformira pod utjecajem atmosferskog tlaka. Mehaničkim sustavom koji očitava promjenu tlaka na skali mjere se promjene u deformaciji aneroidne kapsule. Aneroidni barometri manje su precizni od živinih barometara, ali su sigurniji za uporabu i lako su prenosivi. Njihova mana je to što mogu zahtijevati često umjeravanje.



Slika 2. Aneroidni barometar

1.1.3. Manometar s U-cijevi

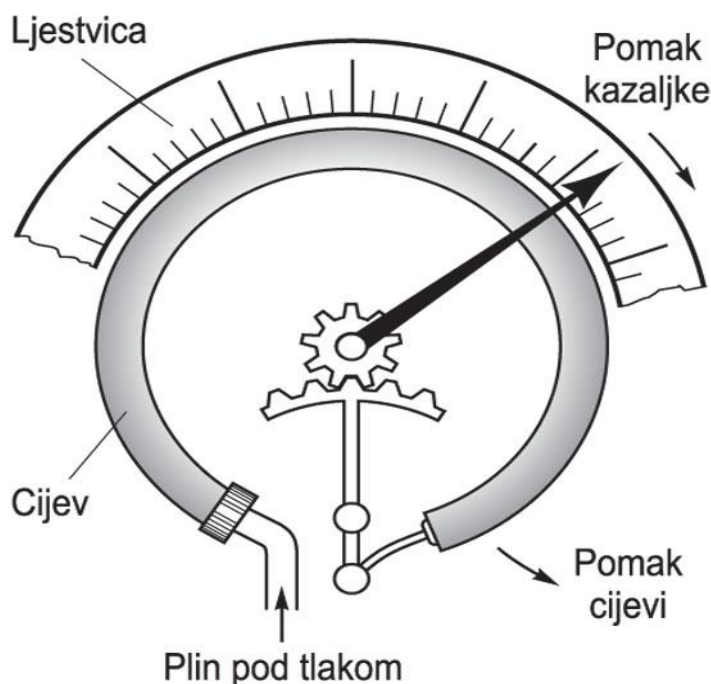
U-manometar najjednostavniji je oblik tekućinskog manometra, a radi na principu da je jedna strana U-cijevi izložena atmosferi, dok druga strana mjeri tlak u određenom sustavu. Mjerenje ovom metodom spada među prve metode mjerenja tlaka, odnosno vakuuma. Takvi manometri zasnivaju se na mjerenju razine tekućine u cijevi. U-manometar je zapravo staklena cijev koja je napunjena tekućinom koja može biti voda ili živa. Tlak se pomoću U cijevi mjeri tako da se jedan kraj cijevi stavi u prostor u kojem je potrebno izmjeriti tlak, a na drugom kraju cijevi je poznati (referentni tlak). Ako je tlak u ispitivanom prostoru manji od poznatog tlaka, u tom se dijelu cijevi razina kapljevine digna, a u suprotnom slučaju se spusti. Jedna od izvedbi je takva da se za poznati tlak uzima okolišni, tj. kraj cijevi u kojem je poznati tlak je otvoren u okolišu. Takva izvedba ima problem stalne promjene atmosferskog tlaka koja utječe na očitavanja na drugom kraju cijevi. Zbog toga se cijev zatvara sa strane okolišnog tlaka te iznad zatvorenog stupca djeluje samo para tekućine, pa je takva izvedba puno preciznija.



Slika 3. U-manometar

1.1.4. Manometri s elastičnom šupljom cijevi- Bourdonova cijev

Mjerila s mehaničkom deformacijom mogu se podijeliti na mjerila koja podnose elastične ili mjerila koja podnose elastične i plastične deformacije. Kod plastičnih deformacija nastaju promjene koje ostaju i nakon prestanka djelovanja sile, dok kod elastičnih deformacija to nije slučaj jer kod elastičnih deformacija promjene koje nastaju isto tako i nestaju kako sila prestaje djelovati. Jedno od mjerila s elastičnom deformacijom je manometar s elastičnom šupljom cijevi koja se naziva Bourdonova cijev. Bourdonova cijev je elastični element koji predstavlja šuplju cijev u obliku spirale. Uglavnom se takve cijevi izrađuju od bakrenih legura s dobrim elastičnim svojstvima. Spirala se pod djelovanjem atmosferskog tlaka elastično deformira te se tlak očitava na skali preko pokazivačke igle koja se pomiče pomoću mehanizma. Bourdonova cijev nije jedini elastični element, koriste se još i mjevovi ili membrane kao elastični elementi u mjerilima.



Slika 4. Bourdonova cijev

1.3. Elektronički senzori tlaka

Elektronički senzori tlaka koriste poluvodičke ili piezoelektrične elemente za pretvaranje mehaničkog tlaka u električni signal, koji se zatim očitava na digitalnom zaslonu.

Piezoelektrični senzori koriste piezoelektrične kristale koji stvaraju električni naboj kada su pod tlakom. Električni signal nakon toga se obrađuje i na zaslonu se prikazuje vrijednost tlaka.

Kapacitivni senzor tlaka je senzor tlaka koji koristi kapacitivnost kao osjetilni element za pretvaranje izmjerene tlaka u promjenu vrijednosti kapacitivnosti. Kapacitivni senzori tlaka koriste okrugli metalni ili pozlaćeni film kao elektrodu kondenzatora, koji se pri promjeni tlaka deformira i tada se kapacitivnost formirana između filma i fiksne elektrode mijenja. Ta promjena se prenosi električnim signalom kojim se očitava tlak.

Piezorezistivni senzori mijenjaju svoj otpor kada su izloženi tlaku i te promjene u otporu pretvaraju se u električni signal koji se koristi za određivanje tlaka.

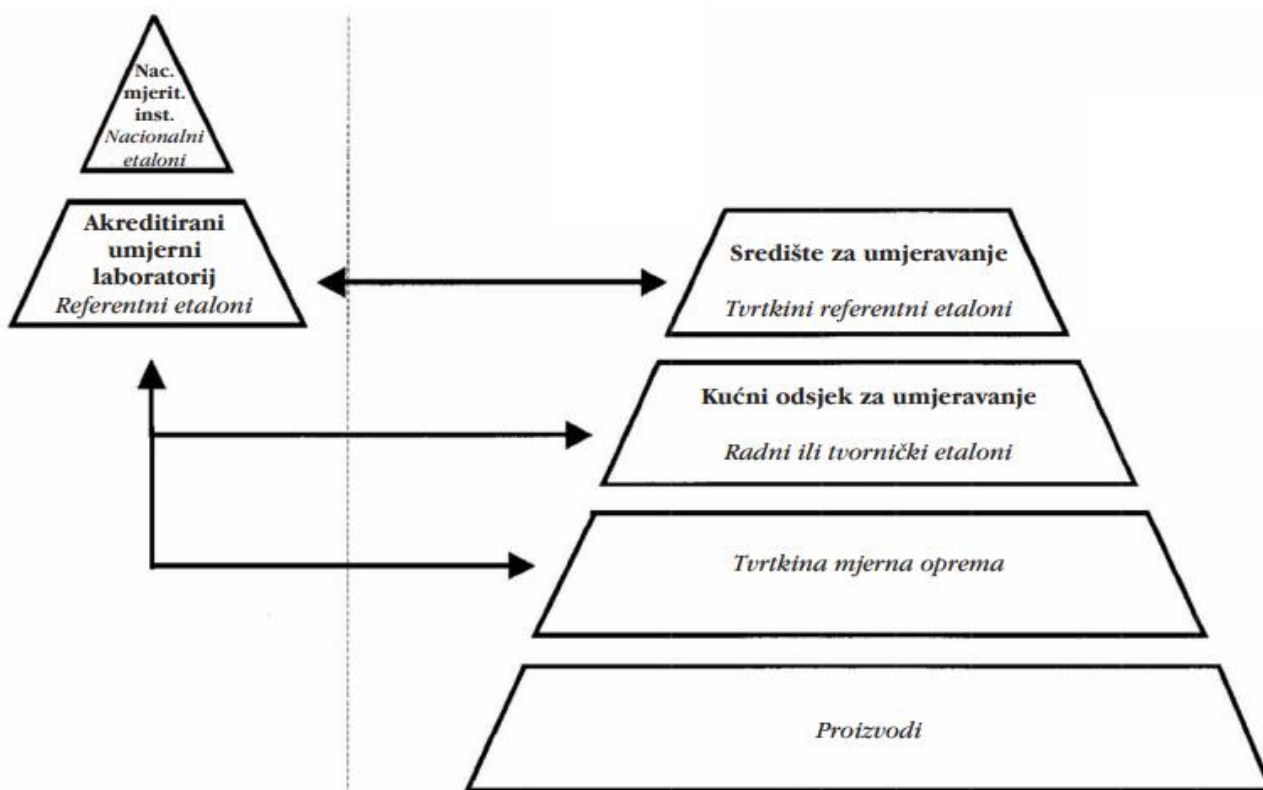
Prednosti elektroničkih senzora tlaka su te što je mjerenje brzo i precizno, te što su lako prenosivi i pogodni za automatsko praćenje i nadzor. Mnogi elektronički barometri ne mjere samo tlak, već osim tlaka mjere temperaturu i vlažnost. Jedna od prednosti je ta što neki elektronički barometri imaju mogućnost bilježenja podataka tijekom vremena. Nedostatak ovakvih senzora je potreba za vanjskim napajanjem i potreba za osiguravanjem odgovarajuće kompenzacije jer mogu biti podložni temperaturnim promjenama.

2. PREGLED METODA ZA ISPITIVANJE I UMJERAVANJE BAROMETARA

Barometri su instrumenti koji se koriste u mnogim područjima, a najviše u tehničkim i meteorološkim disciplinama. Umjeravanje barometra je postupak koji se provodi kako bi se očitavanja ispitivanog barometra potvrdila i prilagodila radi usklađivanja s referentnim instrumentom, etalomom. Ovim procesom se osigurava da na kraju dobijemo barometar koji pokazuje točna mjerenja tlaka.

2.1. Sljedivost i umjeravanje

Sljedivost je svojstvo mjernog rezultata da se kroz neprekinuti niz umjeravanja rezultat može povezati s referencom. Takav proces osigurava pouzdana i točna mjerenja tlaka.



Slika 5. Lanac sljedivosti

Umjeravanje je ključno za osiguravanje sljedivosti i obuhvaća određivanje mjeriteljskih karakteristika mjerila, mjernog sustava ili referentne tvari usporedbom s etalonima. Nakon umjeravanja izdaje se potvrda, a na mjerilo se često stavlja naljepnica. Glavni razlozi za umjeravanje mjerila su:

- Uspostavljanje sljedivosti,
- Osiguravanje usklađenosti očitavanja s drugim mjerenjima,
- Određivanje točnosti očitavanja,
- Provjera pouzdanosti mjerila.

Postoje mnogi dokumenti u kojima su zadane smjernice i zahtjevi koji se trebaju ispuniti tijekom umjeravanja barometra. Ključni dokumenti koji će se koristiti u ovome radu su:

- OIML R 97: Međunarodna organizacija za zakonsko mjeriteljstvo (OIML) je svjetska, međuvladina organizacija čija je zadaća uravnoteživanje propisa i mjeriteljskih provjera napravljenih od strane nacionalnih mjeriteljskih usluga, ili njima sličnih organizacija. Dvije su glavne kategorije od kojih je jedna International Recommendations (OIML R), koja predstavlja propise usmjerene na utvrđivanje metroloških karakteristika potrebnih za određene mjerne instrumente, te se u njima specificiraju metode i oprema potrebna za provjeru njihove usklađenosti. Države članice OIML-a moraju se držati preporuka koliko god je moguće. Druga kategorija je International Documents (OIML D) koja je informativne prirode i služi za pomoć i poboljšanje rada metrologijskih službi. OIML R 97 je preporuka koja daje metrologijske i tehničke zahtjeve primjenjive na instrumente za mjerenje atmosferskog tlaka. Preporuka se odnosi na barometre koji se koriste za izravno mjerenje tlaka u laboratorijima, industrijskim postrojenjima i meteorološkim stanicama.
- DKD-R 6-1: Metoda za umjeravanje barometara koju koristi njemačka mreža laboratorija za umjeravanje (Deutscher Kalibrierdienst). DKD-R 6-1 definira tehničke zahtjeve za umjeravanje barometara, uključujući metode, opremu i uvjete potrebne za precizno umjeravanje.

U ovome radu proces umjeravanja će se vršiti prema OIML-ovim smjernicama pa će se prema tome u nastavku opisati tehnički zahtjevi i proces umjeravanja prema tome dokumentu.

2.2. Metrologijski zahtjevi

Tri razreda točnosti instrumenta primjenjuju se na barometre. U dolje danoj tablici prikazane su maksimalno dopuštene pogreške u rezultatu mjerenja pri verifikaciji za svaki razred točnosti instrumenta:

Tablica 1. Maksimalna odstupanja po razredima točnosti

| Razred instrumenta | Maksimalno dopuštena pogreška u rezultatu mjerenja |
|--------------------|--|
| 0,02 | $\pm 0,02$ kPa ($\pm 0,2$ hPa) |
| 0,05 | $\pm 0,05$ kPa ($\pm 0,5$ hPa) |
| 0,1 | $\pm 0,10$ kPa ($\pm 1,0$ hPa) |

Maksimalna dopuštena greška u uporabi jednaka je maksimalnoj dopuštenoj pogrešci pri verifikaciji.

Vrijednosti svih konstanti korištenih u izračunu tlaka i određivanju korekcija, moraju biti navedene u uputama s točnošću takvom da suma pogrešaka koje se dobiju prilikom njihova korištenja bude manja od 10% maksimalno dopuštene pogreške instrumenta.

2.3. Tehnički zahtjevi

Barometar, koji je zaštićen u skladu s uputama proizvođača, mora biti sposoban izdržati transport bez loma i bez pogrešaka koje bi povećale ukupnu grešku iznad granica koje su prethodno navedene.

Ako je konstrukcija barometra takva da se unutar njega može zadržati tlak koji je različit od atmosferskog tlaka, tada nepropusnost mora biti takva da se najveći i najniži tlak koji barometar može mjeriti mogu održati stabilnim (bez promjene za najveće moguće odstupanje) unutar jedne minute.

U dokumentu su opisani tehnički zahtjevi za živine barometre i barometre s elastičnim elementima. Kako se u ovom radu neće opisivati umjeravanje živinih barometara u nastavku će se opisati tehnički zahtjevi za barometre s elastičnim elementima.

2.3.1 Tehnički zahtjevi za barometre s elastičnim osjetnim elementima

Zahtjevi prema barometrima s elastičnim elementima su:

- Elastični element barometra može biti bilo kojeg prikladnog oblika (npr. mijeh, dijafragma i Bourdonova cijev) i izrađen od materijala koji ima performanse koje su zahtijevane ovom preporukom.
- Očitavanja moraju jasno i nedvosmisleno prikazivati vrijednosti tlaka u jedinicama koje su u skladu s preporukom.
- Instrument mora sadržavati sustav kompenzacije temperature, poput bimetalne trake u mehanizmu, tako da ispunjava zahtjeve barem unutar temperaturnog raspona za koji je instrument namijenjen.
- Primjena tlakova tijekom umjeravanja i ispitivanja instrumenta mora biti olakšana prikladnim rješenjima. Na primjer, kod određenih barometara mehanizam može biti zatvoren u hermetičko kućište s prozorom za promatranje, kako bi se tlak mogao primijeniti na osjetni element putem ventilacijske cijevi, koja mora omogućiti pričvršćivanje prigušnog čepa na kraj ako je potrebno.
- Instrumenti za koje se pokazalo da su osjetljivi na oštećenja od posljedica primjene tlaka izvan radnog raspona moraju biti opremljeni graničnicima za preopterećenje, kako bi se mogli transportirati bez potrebe za posebnim mjerama opreza.
- Barometri koji koriste električne ili elektroničke komponente koje mogu utjecati na njihove mjerne karakteristike moraju biti dizajnirani i izrađeni tako da promjene napona napajanja ili bilo kakve elektromagnetske smetnje ne uzrokuju pogrešku veću od 25% maksimalno dopuštene pogreške.

- Barometar mora biti opremljen priručnikom koji sadrži detaljne upute vezane za transport, instalaciju, umjeravanje, uporabu i održavanje. Priručnik mora također uključivati tablice temperaturnih korekcija ako je potrebno.

2.4. Gradacija

Gradacija za barometre s elastičnim osjetnim elementima:

- Barometri s elastičnim osjetnim elementima moraju biti opremljeni digitalnim ili analognim pokazivačem ili kombinacijom oboje koji omogućava izravno očitavanje tlaka s točnošću do 0,01 kPa (0,1 hPa) ili manje za instrumente razreda točnosti 0,02 ili 0,05 i do 0,02 kPa (0,2 hPa) ili manje za instrumente razreda točnosti 0,1.
- Ako je pokazivač instrumenta digitalan, visina znamenki mora biti najmanje 3 mm. Ako su znamenke formirane kombinacije traka i/ili točaka, primjerice kod LED zaslona, mora biti osigurano sredstvo za provjeru funkcionalnosti svih elemenata. U slučaju nestanka napajanja, zaslon mora ili prestati prikazivati vrijednosti ili prikazati znak upozorenja.
- Instrument mora biti jasno i sigurno označen odgovarajućom jedinicom tlaka. Ako instrument ima brojčanik i kazaljku, oznaka mora biti na brojčaniku.

2.5. Dodatne oznake

Svi barometri moraju biti jasno i trajno označeni jedinstvenim serijskim brojem, imenom proizvođača, godinom proizvodnje, oznakom modela, brojem ili kodom te oznakama verifikacije. Te oznake moraju biti odvojene od skale kako bi se izbjegla zabuna.

Barometri s elastičnim osjetnim elementima moraju biti jasno i trajno označeni kako bi pokazivali radni položaj i raspon tlaka.

Ako je potrebna korekcija temperature, ta informacija mora biti jasno naznačena na istaknutom mjestu.

2.6. Umjeravanje barometra prema OIML R 97

2.6.1. Opći zahtjevi

Kako bi barometar bio siguran za uporabu potrebno ga je umjeriti i naknadno umjeravati u redovitim razmacima tijekom njegove uporabe. Ako je barometar bio na popravku mora ga se ponovo umjeriti.

2.6.2. Uvjeti umjeravanja

Uvjeti za umjeravanje moraju biti takvi da barometri koji se ispituju nisu izloženi izravnoj sunčevoj svjetlosti, te sve vibracije ili nagle promjene atmosferskog tlaka ne smiju uzrokovati pogrešku veću od 25% maksimalno dopuštene pogreške.

Temperatura tijekom umjeravanja mora biti unutar raspona u kojem će se barometar koristiti i mora se održavati konstantnom unutar $\pm 1^\circ\text{C}$. Ako se predviđa da će barometar raditi u uvjetima koji su na temperaturama $\pm 5^\circ\text{C}$ iznad ili ispod temperature koja je u laboratoriju u kojem se barometar umjerava onda je potrebno provesti dodatne testove na odgovarajućim temperaturama kako bi se odredile potrebne ispravke.

Prema preporuci barometri moraju biti umjereni i za povećanje i za smanjenje tlaka kroz cijeli radni raspon tlaka instrumenta. Kako bi postigli tlakove kroz cijeli raspon ispitnih tlakova potrebno je promjenu tlaka vršiti kontrolirano što nije moguće postići prirodnim promjenama tlaka. Za barometre koji nemaju ventilacijsku cijev umjeravanje se provodi u ispitnoj komori u kojoj se tlak mijenja postupno kroz cijeli radni raspon barometra. Brzina promjene primijenjenog ispitnog tlaka ne smije premašiti 10 Pa/min tijekom očitavanja.

Prije umjeravanja potrebno je provjeriti jesu li svi barometri i pridruženi termometri u dobrom stanju ta da njihova konstrukcija, gradacija i oznake odgovaraju prema zahtjevima koje preporuka OIML R 97 propisuje.

Barometar se mora testirati na nepropusnost u skladu sa zahtjevima preporuke kada je to primjenjivo. Test se mora provesti tri puta i mora trajati najmanje 5 minuta.

2.6.3. Postupak umjeravanja

Umjeravani barometri moraju biti izloženi uvjetima laboratorija u kojem će se umjeravati najmanje 10 sati prije umjeravanja.

Tijekom cijelog procesa umjeravanja instrument se mora koristiti prema preporukama i uputstvima iz priručnika.

Broj ispitnih točaka, tj. broj ispitnih vrijednosti tlaka ovisi o linearnosti instrumenta. Korekcije instrumenta moraju se odrediti za najmanje četiri ispitna tlaka raspoređena kroz cijeli radni raspon instrumenta, pri čemu razmaci između tlakova ne smiju biti veći od 5 kPa. Jedan od ispitnih tlakova mora biti 100 kPa, ako je taj tlak u radnom rasponu barometra. Svaki ciklus umjeravanja mora uključivati niz očitavanja u uzlaznoj putanji i niz očitavanja u silaznoj putanji. Između ispitnih točaka tlak se mora postupno mijenjati brzinom koja nije veća od 0,5 kPa u minuti, a prije očitavanja tlak mora biti stabilan najmanje 5 minuta.

2.6.4. Izvještaj o umjeravanju

Izvještaj o umjeravanju instrumenta mora sadržavati sljedeće informacije:

- Naziv tijela za testiranje
- Ime vlasnika barometra
- Ime proizvođača
- Oznaka, broj ili kod uzorka
- Razred točnosti
- Kratak opis barometra
- Serijski broj pridruženog termometra, ako je ugrađen
- Godina proizvodnje, ako je poznata
- Raspon tlaka u pregledu
- Raspon temperatura u pregledu
- Kratki opis testova

- Sljedivost i maksimalnu pogrešku mjerenja standarda za tlak i temperaturu korištenih pri umjeravanju
- Korekcije za svaki ispitni tlak, izračunate kao srednja vrijednost dobivenih vrijednosti za povećanje i smanjenje tlaka
- Histerezu pri svakom ispitnom tlaku, izraženu kao razliku između srednjih vrijednosti pogrešaka za silazne i uzlazne tlakove
- Datum kada je umjeravanje završeno
- Preporučeni datum za ponovno umjeravanje

3. OPIS ETALONSKOG MJERNOG SUSTAVA S BAROKOMOROM

Etalonski mjerni sustav s barokomorom je sustav kojim će se u ovom radu izvršiti umjeravanje barometara. Mjerni sustav koji će se opisati je sustav koji je postavljen u Laboratoriju za procesna mjerenja (LPM). U ovom poglavlju bit će opisani elementi mjernog sustava s barokomorom. Sustav s barokomorom sastoji se od: vakuumske tlačne pumpe, vakuumske tlačne komore, ispitnog barometra, etalonskog barometra, te uređaja za mjerenja okolišnih uvjeta.

3.1. Opis opreme

Najbitniji element i središnji element ovakvog mjernog sustava je vakuumska tlačna barokomora. Tehničke karakteristike barokomore opisane su u tablici 2.

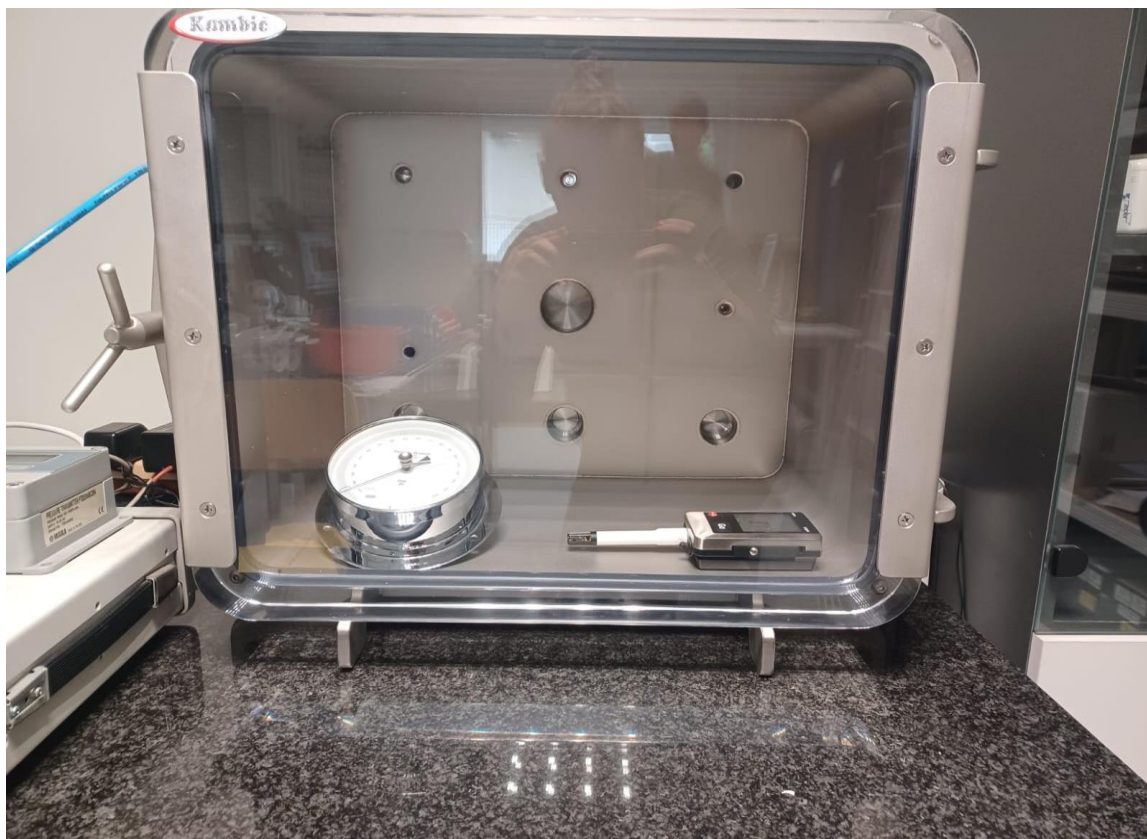
Tablica 2. Tehničke karakteristike vakuumske tlačne barokomore

| Vakuumska tlačna barokomora | |
|-----------------------------|--------------------|
| Proizvođač | Kambič |
| Model | VTK-02 |
| Vanjske dimenzije | 600 x 565 x 450 mm |
| Unutarnje dimenzije | 500 x 400 x 300 mm |
| Radni raspon | 500 – 1300 mbar |
| Vlasnik | FSB – LPM |

Barokomora je napravljena tako da se u njoj može postići podtlak, tj. vakuum, ali i pretlak. Te promjene tlaka uspostavljaju se vakuumske tlačnom pumpom koja je na komoru spojena pomoću fleksibilne cijevi koja na spojevima ima priključak s klampom kako bi se postiglo što bolje brtvljenje, a time i osigurala nepropusnost. Pumpa ima i regulacijski ventil kojim se nakon uspostavljanja ispitnog tlaka taj tlak održava konstantnim ili se regulira.

Na barokomoru je spojen i etalonski barometar na isti način na koji je spojena i pumpa. Kako bi pratili vanjske promjene temperature i vlažnosti uz komoru je postavljen uređaj koji može bilježiti vrijednosti tijekom vremena.

Vrata barokomore napravljena su kao transparentna staklena kako bi se omogućilo umjeravanje barometra jer na taj način tijekom promjena tlaka moguće je očitavati vrijednosti s ispitnog barometra koji se nalazi unutar barokomore. Barokomora je velika pa je u nju moguće postaviti više barometara koje je potrebno umjeriti. Vrata barokomore se zatvaraju pomoću brtve i mehaničkog zaključnog mehanizma s polugom. Time se omogućava da se u barokomori može postići vakuum i pretlak, a da je pritom osigurana nepropusnost i bolja ponovljivost, te se smanjuje nesigurnost. Na komori se sa stražnje strane nalaze priključci na koje se spaja pumpa i etalonsko mjerilo, na stražnjoj strani nalazi se i sigurnosni ventil.



Slika 6. Vakuumsko tlačna barokomora

Na slici 6. prikazana je barokomora koja je u vlasništvu Laboratorija za procesna mjerenja. U njoj su postavljena dva barometra koja su se za potrebe ovog rada umjeravali.

Uz barokomoru stoji vakuumsko tlačna pumpa kojom u barokomori postizemo vakuum ili pretlak u cijelom radnom rasponu barokomore. Pomoću pumpe provjerava se karakteristika barokomore na taj način da se prije umjeravanja provjeri stabilnost najvišeg i najnižeg tlaka u barokomori. Pumpa na prednjoj strani ima prekidač koji se okreće na lijevu ili desnu stranu ovisno o tome želimo li stvarati podtlak ili pretlak.

Ispod prekidača nalazi se regulacijski ventil koji nam služi za održavanje tlaka konstantnim nakon što se uspostavi željeni tlak ili nam služi za regulaciju tlaka jer je s njime omogućena preciznija i sporija regulacija tlaka. To se sve može vidjeti na slici 7. na kojoj je prikazana pumpa koja se koristila za potrebe umjeravanja. Pumpa je istog proizvođača kao barokomora i dolazi zajedno s komorom.

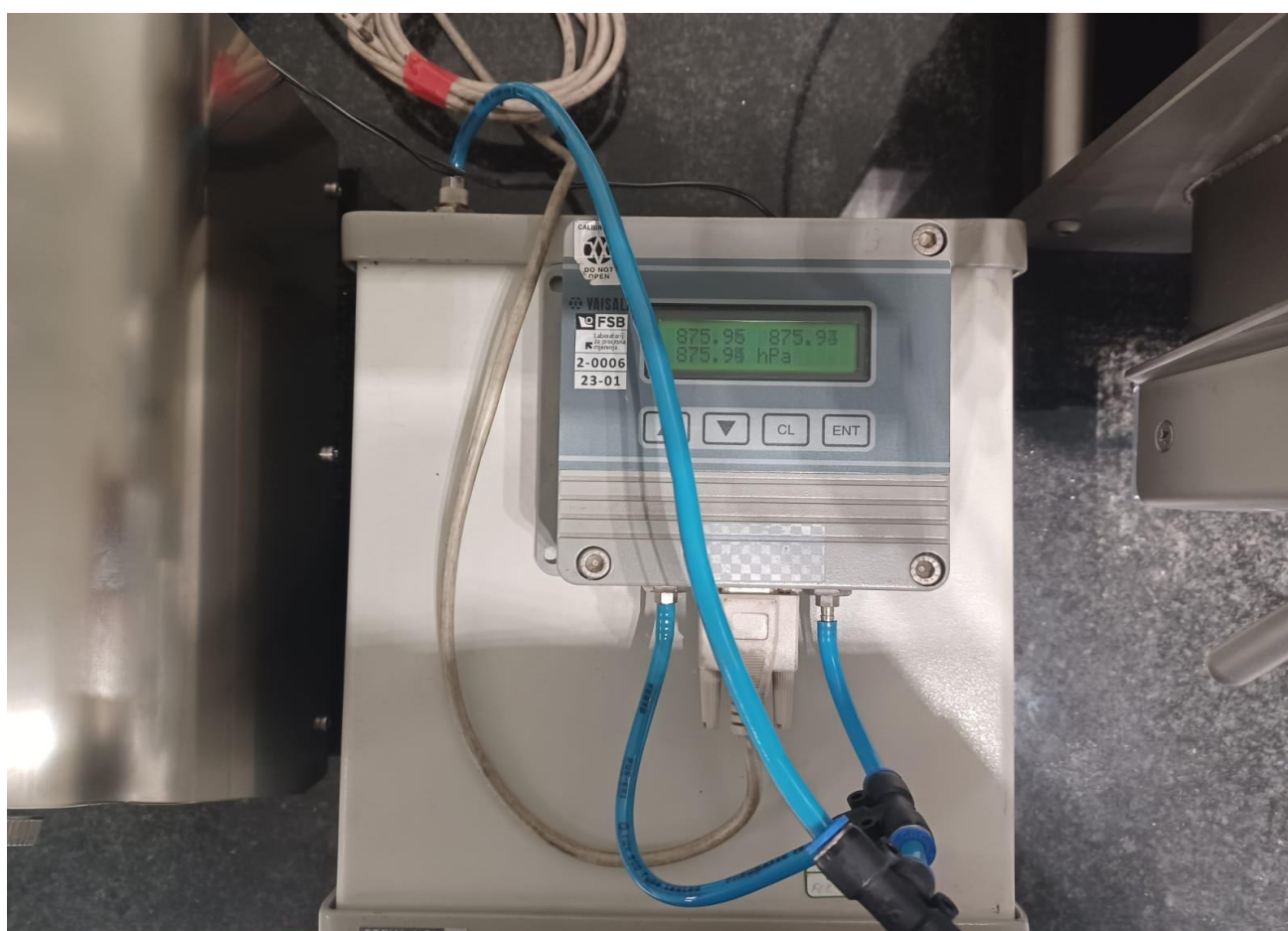


Slika 7. Vakuumsko tlačna pumpa

Etalonski barometar kao i vakuumsko tlačna pumpa spojen je s komorom pomoću fleksibilne cjevčice. Etalonski barometar koji se koristi u ovom radu prethodno je umjeren na tlačnoj vagi. Pri umjeravanju etalonskog barometra pomoću tlačne vage puno su manje mjerne nesigurnosti nego pri usporednom umjeravanju u barokomori. U sljedećoj tablici dane su tehničke karakteristike etalonskog barometra.

Tablica 3. Tehničke karakteristike etalonskog barometra

| Radni etalon Vaisala PTB 220 | |
|------------------------------|-----------------|
| Proizvođač | Vaisala |
| Tvornički broj | T504009 |
| Tip | PTB 220 |
| Mjerno područje | 500 – 1100 mbar |
| Jedinica tlaka | mbar (hPa) |
| Podjela skale | 0,01 mbar |
| Vlasnik mjerila | LMP – FSB |
| Laboratorijska oznaka | TLPRE01 |



Slika 8. Etalonski barometar Vaisala PTB 220

Umjeravanje je provedeno za tri barometra, od kojih su dva bila unutar barokomore, a jedan je bio vani spojen s etalonskim barometrom. Unutar komore umjeravali su se barometar proizvođača Testo, a drugi proizvođača Lufft. Vanjski barometar je od proizvođača Ruska. Njihove tehničke karakteristike dane su u tablici dolje.

Tablica 4. Tehničke karakteristike umjeranih barometara

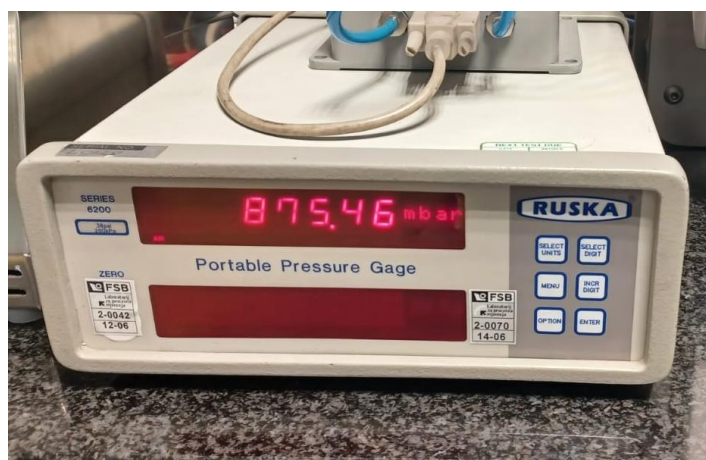
| | Lufft barometar | Ruska barometar | Testo 176P1 |
|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Proizvođač | Lufft | Ruska | Testo |
| Tvornički broj | 98 987 | L0128 | 41002729 |
| Tip | Präzisions | 6200 | 176P1 |
| Mjerno područje | 860 – 1100 mbar | 0 – 2600 mbar | 600 – 1100 mbar |
| Jedinica tlaka | mbar (hPa) | mbar (hPa) | mbar (hPa) |
| Podjela skale | 0,5 mbar | 0,01 mbar | 0,1 mbar |
| Vlasnik mjerila | LPM – FSB | LPM – FSB | LPM – FSB |
| Laboratorijska oznaka | / | / | TEOKO9 |



Slika 9. Barometar proizvođača Lufft



Slika 11. Barometar Testo PTB 220



Slika 10. Barometar Ruska

Na slikama 9., 10. i 11. prikazani su barometri koji su se za potrebe ovog rada umjerali.

Kako bi pratili promjene temperature zraka u laboratoriju, u blizini barokomore postavljen je i uređaj kojim smo pratili promjenu temperature i vlažnosti zraka. Uređaj koji se koristi je Testo 175H1 uređaj proizvođača Testo.



Slika 12. Uređaj Testo 175H1 za mjerenje temperature i vlažnosti zraka

4. OPIS ETALONSKOG MJERNOG SUSTAVA S TLAČNOM VAGOM

Referentni barometar koji je u ovome radu korišten kao etalon, umjeren je na tlačnoj vagi u Laboratoriju za procesna mjerenja. Tlačne vage su vrlo precizni instrumenti za mjerenje tlaka koji se najčešće koriste kao etaloni za umjeravanje različitih mjerila tlaka jer osiguravaju male mjerne nesigurnosti. U ovome poglavlju opisan će se princip rada tlačne vage i umjeravanja barometra koji predstavlja etalon.

4.1. Opis tlačne vage

Tlačna vaga je precizni instrument koji daje vrlo točne rezultate mjerenja tlaka. Najčešće se koriste kao etaloni za umjeravanje različitih vrsta mjerila tlaka. Ovaj instrument se koristi kao primarni standard za umjeravanje različitih instrumenata za mjerenje tlaka, poput barometra i manometra. Tlačne vage sastoje se od sklopa klip/cilindar, sustava za ostvarivanje vertikalne sile na klip te sustava za generiranje tlaka u radnom fluidu. Princip rada tlačne vage temelji se na osnovnoj fizikalnoj formuli za tlak:

$$p = \frac{F}{A_e}$$

Gdje je:

p = tlak generiran u sustavu

F = sila koja djeluje na klip, a koja je rezultat mase utega i gravitacije

A_e = efektivna površina klipa na koju djeluje sila

Sila F koja djeluje na klip izračunava se kao:

$$F = mg$$

Gdje je:

m = masa utega

g = gravitacijsko ubrzanje

Površina klipa A_e je poznata i umjerena, te se primjenom različitih masa na klip može generirati točno definiran tlak unutar sustava.

Najbitniji dio tlačne vage je sklop klip/cilindar koji je izrađen prema najfinijim strojarskim tolerancijama od materijala koji mogu izdržati visoka dinamička opterećenja u elastičnom području na svojoj karakteristici naprezanja σ i deformacije ϵ . Taj sklop služi za definiranje efektivne površine A_e . Preko fluida (plin ili ulje) mjereni tlak djeluje na bazu klipa i stvara resultantnu vertikalnu silu koja djeluje prema gore. U suprotnom smjeru djeluje gravitacijska sila utega F koji su postavljeni na klip.

Na vagu se postavljaju mnogi zahtjevi kako bi se osigurao njen siguran rad:

- Prethodno je napisano kako sklop klip/cilindar mora biti izrađen od materijala koji su sposobni izdržati dinamičko opterećenje, to je uglavnom volframov karbid s različitim udjelima kobalta i nikala. Sklop mora biti izrađen s vrlo uskim tolerancijama, a zazor

ne smije biti veći od 0,5 – 1 μm i bilo bi dobro da je konstantan duž cijele dodirne površine.

- Efektivna površina pri atmosferskom tlaku mora biti konstantna duž cijele dužine sklopa klip/cilindar.
- Bitno je osigurati nepropusnost sustava, a to se vrši pomoću izabраниh spojnih elemenata i brtvi koje osiguravaju dobro brtvljenje. Vrlo je bitna brtva koja se nalazi na dnu jer ona mora osigurati nepropusnost i nakon duljeg vremena opterećivanja tlačne vage.
- U donjem dijelu ne smije se sakupljati tekućina što se osigurava takvom konstrukcijom sklopa klip/cilindar da se izbjegnu neželjeni efekti.
- Kako na efektivnu površinu velik utjecaj ima promjera temperature, sklop klip/cilindar mora biti opremljen termometrom.
- Utezi se na tlačnu vagu postavljaju ručno ili automatski. Kako bi se izbjeglo trenje sklop klip/cilindar mora rotirati konstantnom brzinom. Kako se u ovom slučaju rotacija osigurava elektromotorom, on mora biti na dovoljnoj udaljenosti od vage kako bi se spriječio utjecaj njegovih toplinskih gubitaka, te se time spriječila pogreška u očitavanju podataka.

4.1.1. Vrste tlačnih vaga

Tlačne vage prema konstrukciji dijele se na:

- tlačne vage s jednostavnom konfiguracijom sklopa klip/cilindar
- tlačne vage s uvučenom konfiguracijom sklopa klip/cilindar
- tlačne vage s tlakom kontroliranim zazorom

Tlačne vage prema mediju koji koriste dijele se na:

- plinske tlačne vage
- uljne tlačne vage

Etalon kojim se koristimo u ovome radu umjeren je na plinskoj tlačnoj vagi proizvođača DH Instruments. Njezine tehničke karakteristike opisane su u tablici 5.

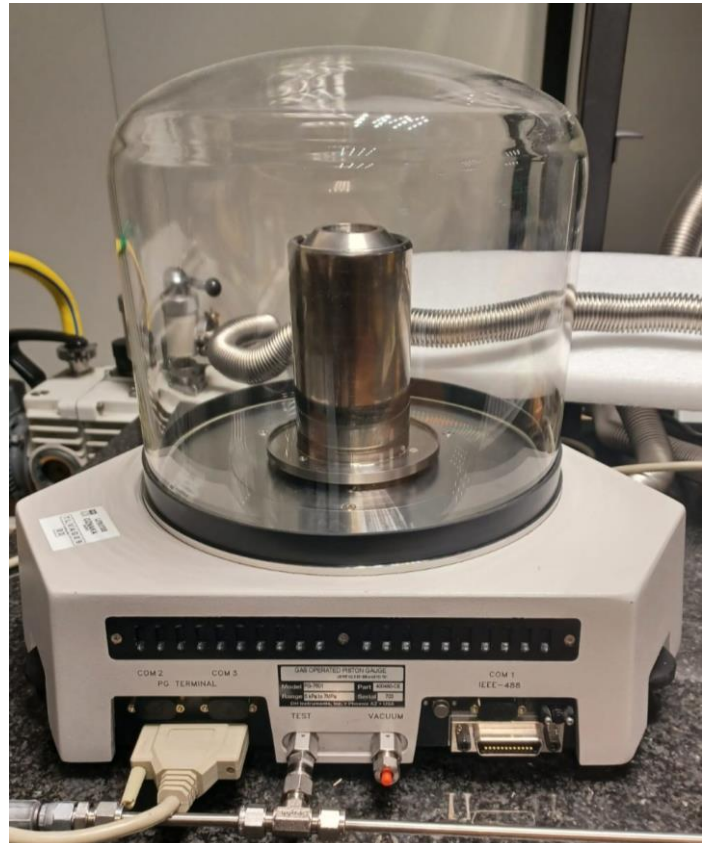
Tablica 5. Tehničke karakteristike tlačne vage TLVAG09

| | |
|-----------------------|----------------|
| Plinska tlačna vaga | |
| Proizvođač | DH Instruments |
| Tvornički broj | 703 |
| Tip | PG-7601 |
| Mjereno područje | 5 kPa – 7 MPa |
| Vlasnik | LPM – FSB |
| Laboratorijska oznaka | TLVAG09 |
| Medij | Dušik |

Tlačna vaga TLVAG09 koristi dušik kao medij kojim se djeluje na sklop klip/cilindar. U blizini tlačne vage nalazi se spremnik sa dušikom koji se spojen na tlačnu vagu.



Slika 13. Spremnik dušika



Slika 14. Tlačna vaga

Na slikama 13. i 14. prikazani su spremnik dušika koji je povezan s tlačnom vagom i tlačna vaga u vlasništvu Laboratorija za procesna mjerenja. Uz tlačnu vagu dolaze utezi koji imaju točno naznačene mase prema kojim se može odrediti tlak koji generiraju.



Slika 15. Utezi koji dolaze uz tlačnu vagu

4.2. Umjeravanje etalona pomoću tlačne vage

4.2.1. Referentni i radni etaloni

Barometar Vaisala PTB220 koji je za potrebe ovog rada korišten kao etalon umjeren je na tlačnoj vagi. U nastavku slijede zahtjevi prema DKD-R 6-1 koji se nameću referentnom etalonu koji je u ovome slučaju tlačna vaga:

- Umjeravanje se provodi izravnom usporedbom mjernih vrijednosti umjeravanog mjerila s vrijednostima referentnog etalona koji je izravno ili neizravno sljediv prema nacionalnom etalonu.
- Referentni etaloni koji se koriste su mjerila dugoročne stabilnosti, kao što su tlačne vage. One se redovito umjeravaju i opremljene su certifikatom koji navodi proširenu nesigurnost mjerenja pod standardnim uvjetima (20°C, 1 bar).
- Referentni etalon podliježe nadzoru i dokumentaciji akreditacijskog tijela. Ako umjeravanje nije izvedeno pod standardnim uvjetima, potrebno je primijeniti korekcije u izračunu tlaka. Mjerne nesigurnosti pridružene tim korekcijama zbog utjecajnih veličina moraju se uzeti u obzir kao dodatni doprinosi u proračunu nesigurnosti.
- Pri izračunu mjerne nesigurnosti korištenih etalona, sve relevantne utjecajne veličine moraju se uzeti u obzir.
- Radni etaloni dokumentirani u priručniku kvalitete laboratorija umjeravaju se u akreditiranom laboratoriju i opremljeni su certifikatom koji navodi proširenu nesigurnost u vrijeme umjeravanja. Radni etalon podliježe nadzoru akreditacijskog tijela.

4.2.2. Umjeravanje etalona pomoću tlačne vage prema uputama DKD-R 6-1

4.2.2.1. Sposobnost umjeravanja

Prije umjeravanja potrebno je utvrditi sposobnost umjeravanja. Trenutačno stanje umjeravanog instrumenta mora zadovoljiti opće priznate tehničke standarde i specifikacije prema uputama proizvođača. Sposobnost umjeravanja određuje se vanjskim inspekcijama i funkcionalnim testovima.

Vanjske inspekcije obuhvaćaju:

- preglede golim okom radi provjere od oštećenja
- provjeru čistoće opreme
- vizualne inspekcije vezane uz provjeru oznaka i čitljivosti podataka
- provjeru jesu li svi potrebni dokumenti dostupni

Funkcionalni testovi obuhvaćaju:

- Provjeru nepropusnosti sustava
- Provjeru ispravnosti rada kontrolnih elemenata
- Provjeru položaj instrumenata

4.2.2.2. Okolišni uvjeti umjeravanja

Umjeravanje se provodi nakon što se umjeravani instrument uskladi s temperaturom okoline koja mora biti unutar dopuštenog temperaturnog raspona (18°C do 28°C). Umjeravanje se mora provesti pri stabilnoj temperaturi okoline pri čemu promjena temperature ne bi trebala biti veća od ± 1 °C. U slučaju da su uvjeti okoline na krajnjim vrijednostima raspona (18°C ili 28°C) potrebno je uzeti u obzir dodatni doprinos nesigurnosti.

4.2.2.3. Postupak umjeravanja

Zahtjevi za umjeravanje:

- Ako je moguće umjeravanje se treba provoditi u obliku mjernog lanca.
- Potrebno je uzeti u obzir zahtijevani položaj montaže tlačne vage.
- Umjeravanje se treba provoditi na ravnomjerno raspoređenim točkama unutar radnog raspona umjeravanja.
- Ovisno o željenoj mjernoj nesigurnosti, potrebno je provesti jednu ili više mjernih serija.
- Ako umjeravani instrument nema definirano ponašanje prema utjecaju momenta prilikom montaže, ponovljivost se mora odrediti dodatnim stezanjem. U tom slučaju potrebno je dokumentirati vrijednost momenta.
- Razlika visina između umjeravanog instrumenta i referentnog instrumenta mora biti minimalna, a u slučaju da nije tada se mora izračunati korekcija.

Usporedba vrijednosti referentnog i umjeravanog barometra može se provesti na dva načina:

- podešavanje tlaka prema očitavanju umjeravanog elementa
- podešavanje tlaka prema očitavanju referentnog instrumenta

Vrijeme zadržavanja tlaka na najvišoj vrijednosti i vrijeme između dva opterećenja trebaju biti najmanje 30 sekundi. Nakon predopterećenja i postizanja stabilnih uvjeta pod uvjetom da to podržava umjeravani instrument njegova indikacija se postavlja na nulu. Odmah nakon provodi se očitavanje nulte vrijednosti. Očitavanje se između promjena tlaka mora izvršiti najranije 30 sekundi nakon početka promjene tlaka. Očitavanje pri najvišem tlaku radnog raspona mora biti zabilježeno i prije i nakon vremena od najmanje 30 sekundi čekanja. Očitavanje nulte vrijednosti na kraju mjerne serije potrebno je provesti najranije 30 sekundi nakon potpunog rasterećenja.

Tablica 6. Nizovi umjeravanja

| Niz | Željena mjerna nesigurnost u % od mjernog raspona | Minimalni broj radnih točaka | Broj predopterećenja | Promjena opterećenja i vrijeme čekanja | Vrijeme čekanja na najvišem tlaku mjernog raspona | Broj serija uzlazno | Broj serija silazno |
|-----|---|------------------------------|----------------------|--|---|---------------------|---------------------|
| A | < 0,1 | 9 | 3 | > 30 s | 2 min | 2 | 2 |
| B | 0,1 – 0,6 | 9 | 2 | > 30 s | 2 min | 2 | 1 |
| C | > 0,6 | 5 | 1 | > 30 s | 2 min | 1 | 1 |

U tablici 6. opisani su nizovi umjeravanja i njihovi zahtjevi.

5. Postupak umjeravanja

Prije umjeravanja provode se provjere svi elemenata mjernog sustava i ispituju se njihovi tehnički zahtjevi koji su propisani OIML dokumentom. Mjerno područje umjeranih barometara kreće se od 800 do 1100 mbar. Prije početka umjeravanja barokomoru je potrebno tlačiti na granične tlakove mjernog raspona te ih zadržati stabilnim barem 60 sekundi. Nakon toga kreće umjeravanje. Umjeravanje smo krenuli s tlakom od 876 mbar kao prvom točkom, te smo umjeravanje nastavili s ravnomjerno raspoređenim točkama koje nisu imale korak veći od 50 mbar kako je i propisano u OIML-u. Umjeravanje je provedeno u šest točaka. U komoru smo postavili barometre koje smo umjeravali, a to su barometar Testo TEOKO9 barometar proizvođača Lufft. Izvan komore postavljen je barometar proizvođača Ruska koji je nepropusnom cijevi spojen na etalonski barometar proizvođača Vaisala, te je spojen i na barokomoru. Prvo smo provjerili stabilnost najviše točke koja je u našem slučaju 1040 mbar, a nakon toga smo provjerili stabilnost tlaka na najnižoj točki pri tlaku od 876 mbar. Kada smo bili sigurni da je tlak stabilan počeli smo otpuštati ventil vakuumske tlačne pumpe kojim smo u komoru puštali zrak laganom brzinom do iduće točke. Ventilom smo regulirali tlak sve do vrijednosti atmosferskog tlaka zraka, nakon čega smo upalili pumpu na stranu tlak kako bi došli do točke na kojoj je tlak 1000 mbar, koja je prema zahtjevima OIML-a morala biti jedna od točaka. Postupak smo ponovili i kako bi došli do najviše točke sustava, tj. paljenjem pumpe na stranu tlak pretlačili smo komoru na tlak 1040 mbar. To je bila naša uzlazna serija. Na svakoj točki bilježila su se očitavanja sva tri umjeravana barometra i očitavanja etalonskog barometra. Na svakoj točki održali smo tlak stabilnim barem 5 minuta prije nove promjene tlaka. Na tlaku od 1040 mbar smo ponovili očitavanja i krenuli smo silaznom serijom prema tlaku od 1000 mbar, koji smo postigli otpuštanjem ventila. Naravno kao i u uzlaznoj seriji tako i u silaznoj seriji regulaciju ventilom mogli smo provesti samo do atmosferskog tlaka, a nakon toga smo upalili pumpu na stranu vakuum kako bi došli do iduće točke tlaka. Postupak smo proveli do najniže točke na kojoj smo kao i na svim točkama ponovili očitavanja. Naravno i u uzlaznoj i u silaznoj seriji nakon uspostavljanja željenog tlaka ventil smo potpuno zatvorili.

Zbog problema koji stvara veliki volumen barokomore ne može se provoditi toliko precizna regulacija i pri silaznoj seriji nije bilo moguće ponoviti očitavanja etalonskog barometra koja smo dobili u uzlaznoj seriji. Kako bi dobili jednu vrijednost u silaznoj i uzlaznoj seriji odlučili smo uzeti srednje vrijednosti očitavanja etalonskog barometra na svim točkama. U tablici 7. vide se očitavanja etalonskog barometra u uzlaznoj i silaznoj seriji i srednja vrijednost tih očitavanja kojom ćemo se služiti kao očitanjem etalonskog barometra.

Tablica 7. Prikaz očitavanja etalonskog barometra

| Mjerna točka | Nazivni tlak [mbar] | Uzlazno, $p_{e,u}$ [mbar] | Silazno $p_{e,s}$ [mbar] | Srednja vrijednost [mbar] |
|--------------|---------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 1 | 876 | 876,54 | 975,80 | 876,17 |
| 2 | 900 | 902,66 | 901,47 | 902,07 |
| 3 | 940 | 939,83 | 939,37 | 939,82 |
| 4 | 980 | 982,75 | 981,80 | 982,28 |
| 5 | 1000 | 999,15 | 999,67 | 999,41 |
| 6 | 1040 | 1039,05 | 1039,67 | 1039,36 |

U tablicama dalje prikazani su rezultati umjeravanja ispitnih barometara.

Tablica 8. Prikaz rezultata umjeravanja barometra TEOKO9

| Mjerna točka | Tlak etalona, p_e [mbar] | Tlak ispitnog barometra uzlazno, $p_{i,u}$ [mbar] | Tlak ispitnog barometra silazno, $p_{i,s}$ [mbar] | Srednja vrijednost tlaka ispitnog barometra, p_s [mbar] | Odstupanje $p_e - p_s$ [mbar] | Histereza $p_{i,s} - p_{i,u}$ [mbar] |
|--------------|----------------------------|---|---|---|-------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 876,17 | 878,2 | 877,5 | 877,85 | -1,68 | -0,7 |
| 2 | 902,07 | 904,3 | 903,0 | 903,65 | -1,58 | -1,3 |
| 3 | 939,82 | 941,4 | 941,4 | 941,40 | -1,58 | 0,0 |
| 4 | 982,28 | 984,3 | 983,4 | 983,85 | -1,57 | -0,9 |
| 5 | 999,41 | 1000,5 | 1000,3 | 1000,90 | -1,49 | 0,8 |
| 6 | 1039,36 | 1040,7 | 1041,2 | 1040,95 | -1,59 | 0,5 |

Tablica 9. Rezultati umjeravanja barometra proizvođača Lufft

| Mjerna točka | Tlak etalona, p_e [mbar] | Tlak ispitnog barometra uzlazno, $p_{i,u}$ [mbar] | Tlak ispitnog barometra silazno, $p_{i,s}$ [mbar] | Srednja vrijednost tlaka ispitnog barometra, p_s [mbar] | Odstupanje $p_e - p_s$ [mbar] | Histereza $p_{i,s} - p_{i,u}$ [mbar] |
|--------------|----------------------------|---|---|---|-------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 876,17 | 875,5 | 876,0 | 875,8 | 0,42 | 0,5 |
| 2 | 902,07 | 902,0 | 901,0 | 901,5 | 0,57 | -1,0 |
| 3 | 939,82 | 939,0 | 938,0 | 938,5 | 1,32 | -1,0 |
| 4 | 982,28 | 981,5 | 979,5 | 980,5 | 1,78 | -2,0 |
| 5 | 999,41 | 998,5 | 998,0 | 998,3 | 1,16 | -0,5 |
| 6 | 1039,36 | 1036 | 1036,0 | 1036,0 | 3,36 | 0,0 |

U tablicama 8., 9. i 10. su prikazani rezultati umjeravanja naših ispitnih barometara. U tablicama se nalaze i izračunate vrijednosti odstupanja i histereze. Odstupanje se računa kao razlika između vrijednosti tlaka etalona i srednje vrijednosti tlaka ispitnog barometra koja se uzima iz uzlazne i silazne serije. Histerezu računamo kao razliku vrijednosti tlaka ispitnog barometra u silaznoj seriji i vrijednosti tlaka ispitnog barometra u uzlaznoj seriji.

Tablica 10. Rezultati umjeravanja barometra proizvođača Ruska

| Mjerna točka | Tlak etalona, p_e [mbar] | Tlak ispitnog barometra uzlazno, $p_{i,u}$ [mbar] | Tlak ispitnog barometra silazno, $p_{i,s}$ [mbar] | Srednja vrijednost tlaka ispitnog barometra, p_s [mbar] | Odstupanje $p_e - p_s$ [mbar] | Histereza $p_{i,s} - p_{i,u}$ [mbar] |
|--------------|--------------------------------|---|---|---|-----------------------------------|--|
| 1 | 876,17 | 876,19 | 875,35 | 875,77 | 0,40 | -0,84 |
| 2 | 902,07 | 902,20 | 901,00 | 901,6 | 0,47 | -1,20 |
| 3 | 939,82 | 939,37 | 939,35 | 939,36 | 0,46 | -0,02 |
| 4 | 982,28 | 982,29 | 981,38 | 981,84 | 0,44 | -0,91 |
| 5 | 999,41 | 998,74 | 999,25 | 999,00 | 0,41 | 0,51 |
| 6 | 1039,36 | 1038,67 | 1039,22 | 1038,95 | 0,41 | 0,55 |

Tijekom umjeravanja pratili smo uvjete zraka u laboratoriju. Ti podaci zapisani su u tablici 11. Podatke smo dobili uređajem za mjerenje temperature i vlažnosti zraka proizvođača Testo, tipa 175H1.

Tablica 11. Podaci dobiveni uređajem Testo 175H1

| | Vrijeme | Vlaga[% rH] | Temperatura[°C] |
|---|----------|-------------|-----------------|
| 1 | 10:16:26 | 68,4 | 22,4 |
| 2 | 11:16:26 | 40,4 | 23,4 |
| 3 | 12:16:26 | 38,1 | 23,3 |
| 4 | 13:16:26 | 38,8 | 23,3 |

6. MJERNA NESIGURNOST

Mjerna nesigurnost je pozitivni parametar koji karakterizira raspon vrijednosti koje se pripisuju rezultatu mjerenja. Postupak za procjenu mjerne nesigurnosti provest ćemo prema uputstvima koje daje DKD-R 6-1. Prema DKD-R 6-1 model za procjenu mjerne devijacije očitavanja je:

$$\Delta p = p_m - p_e + \delta p_i$$

Gdje se u obzir uzima tlak izmjeren umjeravanim barometrom, tlak izmjeren etalon i razlika tlaka u ovisnosti o odabranoj metodi umjeravanja. Prema toj formuli računa se ukupna mjerna nesigurnost:

$$U = k \cdot \sqrt{u_e^2 + u_m^2 + u_i^2}$$

Gdje je:

k – faktor prekrivanja (prema DKD-R 6-1 odabran je $k=2$)

u_e – standardna mjerna nesigurnost etalona

u_m – standardna mjerna nesigurnost umjeravanog mjerila

u_i – standardna mjerna nesigurnost zbog odabrane metode umjeravanja

Formulu za tlak možemo raspisati:

$$\Delta p = p_m - p_{standard,e} + \delta p_{nulta\ devijacija} + \delta p_{ponovljivosti} + \delta p_{histereze}$$

I iz toga dolazimo do formule za ukupnu mjernu nesigurnost:

$$U = k \cdot \sqrt{u_{standard,e}^2 + u_{rezolucije,m}^2 + u_{ponovljivost}^2 + u_{histereza}^2}$$

Gdje je:

$u_{standard,e}$ – mjerna nesigurnost propisana potvrdom o umjeravanju etalona

$u_{rezolucije,m}$ – mjerna nesigurnost zbog rezolucije mjerila

$u_{ponovljivost}$ – mjerna nesigurnost s obzirom na ponovljivost

$u_{histereza}$ – mjerna nesigurnost u ovisnosti o histerezi

U izračun mjerne nesigurnosti mogli su se uzeti još utjecaj promjene temperature, mjerna nesigurnost nulte devijacije ili nesigurnost u ovisnosti s razlikom u visini. Ali te sve vrijednosti minimalno utječu na mjernu nesigurnost te ih tako nećemo ni razmatrati, niti uzeti u obzir pri računanju.

U mnogim slučajevima moguće je navesti samo gornju (a+) i donju granicu (a-) vrijednosti neke veličine, pri čemu se sve vrijednosti unutar tih granica mogu smatrati jednako vjerojatnima. Ova situacija najbolje opisuje pravokutnom gustoćom vjerojatnosti.

Iz formule: $a_+ + a_- = 2a$

Dobiva se procjena ulazne/utjecajne veličine: $x_i = \frac{1}{2} \cdot (a_+ + a_-)$

A iz nje se dobije pridružena standardna nesigurnost: $u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}}$

Ponovljivost se računa kao razlika između dvije uzlazne vrijednosti (vrijednost iz druge serije minus vrijednost iz prve serije). Kako nismo ponavljali uzlaznu i silaznu seriju, ponovljivost smo odredili tako da smo ponovili uzlazno umjeravanje samo za točku na tlaku 1000 mbar. Zapisali smo očitavanja za sva tri barometra i na kraju smo ponovljivost na toj točki pretpostavili kao ponovljivost na svim točkama za određeni barometar.

6.1. Proračun nesigurnosti za umjeravanje barometra Testo 176P1 (TEOKO9)

U nastavku slijede rezultati izračuna mjerne nesigurnosti za svih 6 točaka pri umjeravanju barometra Testo 176P1. Ponovljivost pri točki 5. na tlaku 1000 mbar bila je 1,2 te tu vrijednost ponavljamo za sve točke. Izračun je proveden prema uputstvima iz DKD-R 6-1.

Tablica 12. Mjerna nesigurnost točke 1

| Točka 1: $p_1 = 876,17 \text{ mbar}$ | | | | | |
|---|------------------------|--------------------------|-------------|----------------------------------|---------------------|
| Utjecajna veličina, x_i | Procjena, x_i [mbar] | Širina distribucije $2a$ | Faktor - | Koeficijent osjetljivosti, c_i | Izračun u^2 |
| $p_{standard,e}$ | 876,17 | 0,08 | 2 | 1 | 0,0016 |
| $p_{rezolucije,m}$ | 876,17 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,00083348 |
| $\delta p_{ponovljivost,i}$ | 0 | 1,2 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,12002067 |
| $\delta p_{histereza,i}$ | 0 | -0,7 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,04084037 |
| | | | | | $\Sigma=0,16329452$ |
| Ukupna mjerna nesigurnost: $U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2} = 0,8 \text{ mbar}$ | | | | | |

Tablica 13. Mjerna nesigurnost točke 2

| Točka 2: $p_2 = 902,07 \text{ mbar}$ | | | | | |
|---|------------------------|--------------------------|-------------|----------------------------------|---------------------|
| Utjecajna veličina, x_i | Procjena, x_i [mbar] | Širina distribucije $2a$ | Faktor - | Koeficijent osjetljivosti, c_i | Izračun u^2 |
| $p_{standard,e}$ | 902,07 | 0,0577 | 2 | 1 | 0,00083232 |
| $p_{rezolucije,m}$ | 902,07 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,00083348 |
| $\delta p_{ponovljivost,i}$ | 0 | 1,2 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,12002067 |
| $\delta p_{histereza,i}$ | 0 | -1,3 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,14085760 |
| | | | | | $\Sigma=0,25254407$ |
| Ukupna mjerna nesigurnost: $U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2} = 1,0 \text{ mbar}$ | | | | | |

Tablica 14. Mjerna nesigurnost točke 3

| Točka 3: $p_3 = 939,82 \text{ mbar}$ | | | | | |
|---|------------------------|--------------------------|-------------|----------------------------------|---------------------|
| Utjecajna veličina, x_i | Procjena, x_i [mbar] | Širina distribucije $2a$ | Faktor - | Koeficijent osjetljivosti, c_i | Izračun u^2 |
| $p_{standard,e}$ | 939,82 | 0,0569 | 2 | 1 | 0,0080940 |
| $p_{rezolucije,m}$ | 939,82 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,00083348 |
| $\delta p_{ponovljivost,i}$ | 0 | 1,2 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,12002067 |
| $\delta p_{histereza,i}$ | 0 | 0 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0 |
| | | | | | $\Sigma=0,12166355$ |
| Ukupna mjerna nesigurnost: $U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2} = 0,7 \text{ mbar}$ | | | | | |

Tablica 15. Mjerna nesigurnost točke 4

| Točka 4: $p_4 = 982,28 \text{ mbar}$ | | | | | |
|---|------------------------|--------------------------|-------------|----------------------------------|---------------------|
| Utjecajna veličina, x_i | Procjena, x_i [mbar] | Širina distribucije $2a$ | Faktor - | Koeficijent osjetljivosti, c_i | Izračun u^2 |
| $p_{standard,e}$ | 939,28 | 0,05556 | 2 | 1 | 0,00077173 |
| $p_{rezolucije,m}$ | 939,28 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,00083348 |
| $\delta p_{ponovljivost,i}$ | 0 | 1,2 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,12002067 |
| $\delta p_{histereza,i}$ | 0 | -0,9 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,06751163 |
| | | | | | $\Sigma=0,18913751$ |
| Ukupna mjerna nesigurnost: $U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2} = 0,9 \text{ mbar}$ | | | | | |

Tablica 16. Mjerna nesigurnost točke 5

| Točka 5: $p_5 = 999,41 \text{ mbar}$ | | | | | |
|---|------------------------|--------------------------|-------------|----------------------------------|---------------------|
| Utjecajna veličina, x_i | Procjena, x_i [mbar] | Širina distribucije $2a$ | Faktor - | Koeficijent osjetljivosti, c_i | Izračun u^2 |
| $p_{standard,e}$ | 999,41 | 0,05636 | 2 | 1 | 0,00079411 |
| $p_{rezolucije,m}$ | 999,41 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,00083348 |
| $\delta p_{ponovljivost,i}$ | 0 | 1,2 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,12002067 |
| $\delta p_{histereza,i}$ | 0 | 0,8 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,05334252 |
| | | | | | $\Sigma=0,17499078$ |
| Ukupna mjerna nesigurnost: $U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2} = 0,8 \text{ mbar}$ | | | | | |

Tablica 17. Mjerna nesigurnost točke 6

| Točka 6: $p_6 = 1039,36 \text{ mbar}$ | | | | | |
|---|------------------------|--------------------------|-------------|----------------------------------|---------------------|
| Utjecajna veličina, x_i | Procjena, x_i [mbar] | Širina distribucije $2a$ | Faktor - | Koeficijent osjetljivosti, c_i | Izračun u^2 |
| $p_{standard,e}$ | 1039,36 | 0,05944 | 2 | 1 | 0,00088328 |
| $p_{rezolucije,m}$ | 1039,36 | 0,1 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,00083348 |
| $\delta p_{ponovljivost,i}$ | 0 | 1,2 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,12002067 |
| $\delta p_{histereza,i}$ | 0 | 0,5 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,02083692 |
| | | | | | $\Sigma=0,14257435$ |
| Ukupna mjerna nesigurnost: $U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2} = 0,8 \text{ mbar}$ | | | | | |

Iz dobivenih podataka može se zaključiti da mjernoj nesigurnosti najviše doprinose ponovljivost i histereza. Ostali parametri znatno su manji u odnosu na ponovljivost.

6.2. Proračun nesigurnosti za umjeravanje barometra proizvođača Lufft

Proračun smo radili kao i za barometar Testo 176P1. Ponovljivost je u ovom slučaju 1 mbar.

Tablica 18. Mjerna nesigurnost točke 1

| Točka 1: $p_1 = 876,17 \text{ mbar}$ | | | | | |
|---|------------------------|--------------------------|-------------|----------------------------------|---------------------|
| Utjecajna veličina, x_i | Procjena, x_i [mbar] | Širina distribucije $2a$ | Faktor - | Koeficijent osjetljivosti, c_i | Izračun u^2 |
| $p_{standard,e}$ | 876,17 | 0,05944 | 2 | 1 | 0,0016 |
| $p_{rezolucije,m}$ | 876,17 | 0,5 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,02083692 |
| $\delta p_{ponovljivost,i}$ | 0 | 1 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,08334769 |
| $\delta p_{histereza,i}$ | 0 | 0,5 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,02083692 |
| | | | | | $\Sigma=0,12674539$ |
| Ukupna mjerna nesigurnost: $U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2} = 0,7 \text{ mbar}$ | | | | | |

Tablica 19. Mjerna nesigurnost točke 2

| Točka 2: $p_2 = 902,07 \text{ mbar}$ | | | | | |
|--------------------------------------|------------------------|--------------------------|-------------|----------------------------------|---------------------|
| Utjecajna veličina, x_i | Procjena, x_i [mbar] | Širina distribucije $2a$ | Faktor - | Koeficijent osjetljivosti, c_i | Izračun u^2 |
| $p_{standard,e}$ | 902,07 | 0,0577 | 2 | 1 | 0,00083232 |
| $p_{rezolucije,m}$ | 902,07 | 0,5 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,02083692 |
| $\delta p_{ponovljivost,i}$ | 0 | 1 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,08334769 |
| $\delta p_{histereza,i}$ | 0 | -1 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,08334769 |
| | | | | | $\Sigma=0,18849591$ |

| |
|---|
| Ukupna mjerna nesigurnost: $U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2} = 0,9$ mbar |
|---|

Tablica 20. Mjerna nesigurnost točke 3

| Točka 3: $p_3 = 939,82$ mbar | | | | | |
|---|------------------------|--------------------------|-------------|----------------------------------|---------------------|
| Utjecajna veličina, x_i | Procjena, x_i [mbar] | Širina distribucije $2a$ | Faktor - | Koeficijent osjetljivosti, c_i | Izračun u^2 |
| $p_{standard,e}$ | 939,815 | 0,0569 | 2 | 1 | 0,00080940 |
| $p_{rezolucije,m}$ | 939,815 | 0,5 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,02083692 |
| $\delta p_{ponovljivost,i}$ | 0 | 1 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,08334769 |
| $\delta p_{histereza,i}$ | 0 | -1 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,08334769 |
| | | | | | $\Sigma=0,18848421$ |
| Ukupna mjerna nesigurnost: $U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2} = 0,9$ mbar | | | | | |

Tablica 21. Mjerna nesigurnost točke 4

| Točka 4: $p_4 = 982,28$ mbar | | | | | |
|---|------------------------|--------------------------|-------------|----------------------------------|---------------------|
| Utjecajna veličina, x_i | Procjena, x_i [mbar] | Širina distribucije $2a$ | Faktor - | Koeficijent osjetljivosti, c_i | Izračun u^2 |
| $p_{standard,e}$ | 982,28 | 0,05556 | 2 | 1 | 0,00077173 |
| $p_{rezolucije,m}$ | 982,28 | 0,5 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,02083692 |
| $\delta p_{ponovljivost,i}$ | 0 | 1 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,08334769 |
| $\delta p_{histereza,i}$ | 0 | -2 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,33339076 |
| | | | | | $\Sigma=0,43850278$ |
| Ukupna mjerna nesigurnost: $U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2} = 1,3$ mbar | | | | | |

Tablica 22. Mjerna nesigurnost točke 5

| Točka 5: $p_5 = 999,41$ mbar | | | | | |
|---|------------------------|--------------------------|-------------|----------------------------------|---------------------|
| Utjecajna veličina, x_i | Procjena, x_i [mbar] | Širina distribucije $2a$ | Faktor - | Koeficijent osjetljivosti, c_i | Izračun u^2 |
| $p_{standard,e}$ | 999,41 | 0,05636 | 2 | 1 | 0,00079411 |
| $p_{rezolucije,m}$ | 999,41 | 0,5 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,02083692 |
| $\delta p_{ponovljivost,i}$ | 0 | 1 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,08334769 |
| $\delta p_{histereza,i}$ | 0 | -0,5 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,08334769 |
| | | | | | $\Sigma=0,02083692$ |
| Ukupna mjerna nesigurnost: $U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2} = 0,7$ mbar | | | | | |

Tablica 23. Mjerna nesigurnost točke 6

| Točka 6: $p_6 = 1039,36 \text{ mbar}$ | | | | | |
|---|------------------------|------------------------|-------------|----------------------------------|---------------------|
| Utjecajna veličina, x_i | Procjena, x_i [mbar] | Širina distribucije 2a | Faktor - | Koeficijent osjetljivosti, c_i | Izračun u^2 |
| $p_{standard,e}$ | 1039,36 | 0,05944 | 2 | 1 | 0,08832784 |
| $p_{rezolucije,m}$ | 1039,36 | 0,5 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,02083692 |
| $\delta p_{ponovljivost,i}$ | 0 | 1 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,08334769 |
| $\delta p_{histereza,i}$ | 0 | 0 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0 |
| | | | | | $\Sigma=0,19268675$ |
| Ukupna mjerna nesigurnost: $U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2} = 0,9 \text{ mbar}$ | | | | | |

Kao i kod izračuna mjerne nesigurnosti za barometar Testo 176P1, tako i kod izračuna mjerne nesigurnosti za barometar Lufft najveći doprinos ima ponovljivost. Nakon toga dosta veliki utjecaj ima i histereza. Valja primijetiti kako kod barometra Lufft veće vrijednosti ima i nesigurnost zbog utjecaja rezolucije koja je u ovome slučaju 0,5 mbar.

Barometar Testo 176P1 i barometar Lufft umjeravani su u isto vrijeme u barokomori.

6.3. Proračun nesigurnosti za umjeravanje barometra proizvođača Ruska

U nastavku slijedi proračun mjerne nesigurnosti za umjeravanje barometra Ruska. Barometar je umjeravan izvan komore, a na etalon je bio spojen fleksibilnom cjevčicom. Ponovljivost smo u ovom slučaju izračunali kao vrijednost 0,98 mbar.

Tablica 24. Mjerna nesigurnost u točki 1

| Točka 1: $p_1 = 876,17 \text{ mbar}$ | | | | | |
|--|------------------------|------------------------|-------------|----------------------------------|---------------------|
| Utjecajna veličina, x_i | Procjena, x_i [mbar] | Širina distribucije 2a | Faktor - | Koeficijent osjetljivosti, c_i | Izračun u^2 |
| $p_{standard,e}$ | 876,17 | 0,08 | 2 | 1 | 0,0016 |
| $p_{rezolucije,m}$ | 876,17 | 0,01 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,00000833 |
| $\delta p_{ponovljivost,i}$ | 0 | 0,98 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,08004712 |
| $\delta p_{histereza,i}$ | 0 | -0,84 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,05881013 |
| | | | | | $\Sigma=0,14058945$ |
| Ukupna mjerna nesigurnost: $U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2} = 0,75 \text{ mbar}$ | | | | | |

Tablica 25. Mjerna nesigurnost u točki 2

| Točka 2: $p_2 = 902,07 \text{ mbar}$ | | | | | |
|--|------------------------|--------------------------|-------------|----------------------------------|---------------------|
| Utjecajna veličina, x_i | Procjena, x_i [mbar] | Širina distribucije $2a$ | Faktor - | Koeficijent osjetljivosti, c_i | Izračun u^2 |
| $p_{standard,e}$ | 902,07 | 0,0577 | 2 | 1 | 0,00083232 |
| $p_{rezolucije,m}$ | 902,07 | 0,01 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,00000833 |
| $\delta p_{ponovljivost,i}$ | 0 | 0,98 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,08004712 |
| $\delta p_{histereza,i}$ | 0 | -1,2 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,12002067 |
| | | | | | $\Sigma=0,20103974$ |
| Ukupna mjerna nesigurnost: $U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2} = 0,89 \text{ mbar}$ | | | | | |

Tablica 26. Mjerna nesigurnost u točki 3

| Točka 3: $p_3 = 939,82 \text{ mbar}$ | | | | | |
|--|------------------------|--------------------------|-------------|----------------------------------|---------------------|
| Utjecajna veličina, x_i | Procjena, x_i [mbar] | Širina distribucije $2a$ | Faktor - | Koeficijent osjetljivosti, c_i | Izračun u^2 |
| $p_{standard,e}$ | 939,82 | 0,0569 | 2 | 1 | 0,00080940 |
| $p_{rezolucije,m}$ | 939,82 | 0,01 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,00000833 |
| $\delta p_{ponovljivost,i}$ | 0 | 0,98 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,08004712 |
| $\delta p_{histereza,i}$ | 0 | -0,020 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,00003334 |
| | | | | | $\Sigma=0,08104071$ |
| Ukupna mjerna nesigurnost: $U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2} = 0,57 \text{ mbar}$ | | | | | |

Tablica 27. Mjerna nesigurnost u točki 4

| Točka 4: $p_4 = 982,28 \text{ mbar}$ | | | | | |
|--|------------------------|--------------------------|-------------|----------------------------------|---------------------|
| Utjecajna veličina, x_i | Procjena, x_i [mbar] | Širina distribucije $2a$ | Faktor - | Koeficijent osjetljivosti, c_i | Izračun u^2 |
| $p_{standard,e}$ | 982,28 | 0,05556 | 2 | 1 | 0,00077173 |
| $p_{rezolucije,m}$ | 982,28 | 0,01 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,00000833 |
| $\delta p_{ponovljivost,i}$ | 0 | 0,98 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,08004712 |
| $\delta p_{histereza,i}$ | 0 | -0,91 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,06902022 |
| | | | | | $\Sigma=0,15000308$ |
| Ukupna mjerna nesigurnost: $U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2} = 0,77 \text{ mbar}$ | | | | | |

Tablica 28. Mjerna nesigurnost u točki 5

| Točka 5: $p_5 = 999,41 \text{ mbar}$ | | | | | |
|--|------------------------|--------------------------|-------------|----------------------------------|---------------------|
| Utjecajna veličina, x_i | Procjena, x_i [mbar] | Širina distribucije $2a$ | Faktor - | Koeficijent osjetljivosti, c_i | Izračun u^2 |
| $p_{standard,e}$ | 999,41 | 0,05636 | 2 | 1 | 0,00079411 |
| $p_{rezolucije,m}$ | 999,41 | 0,01 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,00000833 |
| $\delta p_{ponovljivost,i}$ | 0 | 0,98 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,08004712 |
| $\delta p_{histereza,i}$ | 0 | 0,51 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,02167873 |
| | | | | | $\Sigma=0,10268946$ |
| Ukupna mjerna nesigurnost: $U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2} = 0,64 \text{ mbar}$ | | | | | |

Tablica 29. Mjerna nesigurnost u točki 6

| Točka 6: $p_6 = 1039,36 \text{ mbar}$ | | | | | |
|--|------------------------|--------------------------|-------------|----------------------------------|---------------------|
| Utjecajna veličina, x_i | Procjena, x_i [mbar] | Širina distribucije $2a$ | Faktor - | Koeficijent osjetljivosti, c_i | Izračun u^2 |
| $p_{standard,e}$ | 1039,36 | 0,05944 | 2 | 1 | 0,08832784 |
| $p_{rezolucije,m}$ | 1039,36 | 0,01 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,00000833 |
| $\delta p_{ponovljivost,i}$ | 0 | 0,98 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,08004712 |
| $\delta p_{histereza,i}$ | 0 | 0,55 | $2\sqrt{3}$ | 1 | 0,02521268 |
| | | | | | $\Sigma=0,10632571$ |
| Ukupna mjerna nesigurnost: $U = k \cdot \sqrt{\Sigma u^2} = 0,65 \text{ mbar}$ | | | | | |

Kao i kod prethodnih izračuna mjerne nesigurnosti za barometre Testo 176P1 i barometar Lufft, i kod barometra proizvođača Ruska najveći doprinos mjernoj nesigurnosti čini ponovljivost, a prati ju histereza. Može se primijetiti da na nesigurnost kod Ruskinog barometra manje utječe rezolucija jer je ona puno preciznija od prethodna dva barometra.

7. ZAKLJUČAK

Cilj ovoga rada bio je projektirati i realizirati etalonski mjerni sustav kojim bi umjerali mjerni instrument. Pomoću opreme Laboratorija za procesna mjerenja kroz rad je opisan etalonski mjerni sustav s barokomorom i sustav s tlačnom vagom. Za potrebe rada umjeravala su se tri različita barometra. Umjeravanje je izvedeno u Laboratoriju za procesna mjerenja. Prije opisa postupka umjeravanja u radu su opisane metode za mjerenje tlaka okoline, metode za ispitivanje i umjeravanje barometara, te opis etalonskog mjernog sustava s barokomorom. Sustav je uspostavljen s elementima koji su: barokomora, vakuumska tlačna pumpa, umjeravani barometri, etalonski barometar i uređaj za mjerenje uvjeta okoline. Svi elementi su opisani s njihovim tehničkim karakteristikama. U radu je nakon toga opisan i etalonski mjerni sustav s tlačnom vagom jer je etalon koji je korišten u umjeravanju barometara u ovome radu umjeren upravo na tlačnoj vagi.

Umjeravanje je izvedeno prema uputstvima i zahtjevima koji nalaže OIML R 97 dokument. Umjeravanje je provedeno na tri različita barometra koji su barometar Testo 176P1, barometar proizvođača Lufft i barometar Ruska 6200. Umjeravanje je napravljeno za 6 točaka unutar radnog raspona mjerila. Za umjeravanje je korištena barokomora, u kojoj su se različiti uvjeti, tj. različite vrijednosti tlaka postizale uz pomoć vakuumske tlačne pumpe. Nakon umjeravanja može se primijetiti kako veliki volumen barokomore ima veliki utjecaj na preciznost i regulaciju promjene tlak. Bilo je vrlo teško uspostaviti iste vrijednosti tlaka etalona pri uzlaznoj i silaznoj seriji jer pumpa radi vrlo brzo kada se upali na stranu tlak ili vakuum. Na pumpi se nalazi i regulacijski ventil koji može osigurati sporiju regulaciju, ali ni s njime se ne može u potpunosti doći do iste vrijednosti. Na kraju dolazimo do zaključka da se u barokomori umjeravaju uglavnom uređaji za mjerenje tlaka koji neće raditi u uvjetima u kojima je potrebna velika preciznost i točnost izmjenjenog tlaka. Preciznije i točnije umjeravanje dobiva se na tlačnoj vagi, tako da se ona koristi za umjeravanje mjernih uređaja koji služe kao etaloni. Etalon pomoću kojeg je izvedeno umjeravanje, umjeren je na tlačnoj vagi TLVAG09 koja je u vlasništvu Laboratorija za procesna mjerenja.

Na kraju umjeravanja napravljen je izračun mjerne nesigurnosti za sva tri barometra i 6 radnih točaka prema uputstvima koje daje DKD-R 6-1. Iz rezultata izračuna može se primijetiti da najveći utjecaj na mjernu nesigurnost ima ponovljivost koja bi bila puno manja da je bilo moguće ponoviti vrijednosti tlaka etalona u uzlaznoj i silaznoj seriji.

LITERATURA

- [1] Radić K.: Ispitivanje karakteristika vakuumske tlačne komore, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2023.
- [2] Guide to the Measurement of Pressure and Vacuum, The Institute of Measurement and Control London, 1998
- [3] <https://www.enciklopedija.hr/clanak/barometar> - Živin barometar
- [4] <https://enciklopedija.hr/clanak/manometar>
- [5] <https://badu.hr/b9193-vi%C5%A1enamjenska-ku%C4%87anska-meteorolo%C5%A1ka-stanica-aneroidni-barometar-p-744513.html> – Aneroidni barometar
- [6] https://glossary.periodni.com/preuzimanje_slike.php?name=u-tube_manometer.png&source=U-manometar – U-manometar
- [7] <https://tehnicki.lzmk.hr/clanak/bourdonova-cijev> -Bourdonova cijev
- [8] Zakonsko mjeriteljstvo, Državni zavod za mjeriteljstvo. Dostupno na: <https://dzm.gov.hr/cesta-pitanja/zakonsko-mjeriteljstvo-95/95>
- [9] Državni zavod za mjeriteljstvo, EA-4/07 Sljedivost mjerene i ispitne opreme prema nacionalnim etalonima. Dostupno na: <https://dzm.gov.hr/UserDocsImages/dokumenti/Europski%20i%20me%C4%91unarodni%20dokumenti-----Europska%20suradnja/EURAMET%20je%20europski%20savez%20nacionalnih%20mjeriteljskih%20instituta/ea-4-07-preradjena-paginacija.pdf> - Lanac sljedivosti
- [10] International Recommendation: Barometers, OIML R 97, Organisation International de Metrologie Legale, 1990.
- [11] Realization of National Absolute Pressure Standard at LPM, Davor Zvizdic, Lovorka Grgec Bermanec, Tomislav Stasic: XVIII IMEKO WORLD CONGRESS Metrology for a Sustainable Development
- [12] Vukmirović L.: Projekt sustava za umjeravanje mjerila atmosferskog tlaka, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2015.
- [13] Deutscher Kalibrierdienst: Calibration of Pressure Gauges, Guideline DKD-R 6-1, Accreditation Body of the Deutscher Kalibrierdienst, 2014
- [14] Predavanja iz kolegija toplinska i procesna mjerenja (mjerenja u energetici), D Zvizdić, LG Bermanec - FSB, Laboratorij za procesna mjerenja, Zagreb, 2009